

授课课次：1

【教学内容】项目一 继电保护基础元件的全过程认识

【教学目的】通过教学，使学生掌握继电保护的的任务以及对继电保护的基本要求。

【教学重点】继电保护的的任务和基本要求。

【教学难点】加深对继电保护四个基本涵义的理解。

【教学过程】电力系统对供电可靠性要求很高，一旦出现各种故障，将会造成供电中断，而继电保护装置就是针对电力系统的各种故障和不正常运行状态而设计的。而继电保护装置的基础元件就是各种类型的继电器。同时，继电器是通过电流互感器和电压互感器接入主接线的。通过到湖北天堂抽水蓄能电厂参观认识，让学生初步了解水电站继电保护的基本原理，认识继电器和互感器。

§ 项目一 继电保护基础元件的全过程认识

子项目一继电保护的作用

一、本课程在本专业中的地位及教学目标

本课程是本专业的一门主要专业课，通过本课程的学习，能够使大家掌握水电站继电保护装置工作原理、配置原则，常用继电器的试验方法；培养继电保护装置整定计算和识读继电保护装置原理图、展开图的技能，为毕业后从事小型水电站和电力系统继电保护的运行、安装、调试检修及设计工作打下基础。

二、学习本课程的几点要求

- 1、学会抓重点，领会问题的真谛；
- 2、提倡课前预习、课堂听讲、课后复习三部曲；
- 3、扩大自己的视野，以教材为蓝本，钻研相关参考书籍；
- 4、成绩评定：考勤、纪律 20%+作业 10%+小考 20%+期考 50%。

三、电力系统故障和不下常工作状态

电力系统在运行中，由于外界（雷击、鸟兽等）、内部（绝缘损坏、老化等）及操作等原因，可能引起各种故障或不正常工作状态。

（一）故障

1、最常见同时也是最危险的故障是：

- 1) 三相短路
- 2) 两相短路
- 3) 两相接地短路
- 4) 大电流电网中的单相接地短路
- 5) 断线

2、系统发生故障可能引起的的后果是：

- 1) 故障点的电弧使故障设备损坏；
- 2) 短路电流将产生很大的热效应和电动力，而使设备损坏；
- 3) 电压大幅度下降，使其他用户的正常工作遭到破坏；
- 4) 破坏系统运行的稳定性。

（二）不正常工作状态

电力系统中电气设备的正常工作遭到威胁，但并未发展成故障，这种情况称为不正常工作状态。常见的不正常工作状态包括过负荷、过电压、小电流接地电网中的单相接地等。

（三）事故

所谓事故，是指系统的全部或部分的正常工作遭到破坏，造成对用户停止送电、少送电、或电能质量达不到要求，甚至损坏设备等。包括故障和不正常工作状态。

特别指出的是：在实际生产单位中的事故和故障信号所对应的应该是教材上的故障和不正常工作状态。目前新建的单位已经改成了故障与不正常工作信号。

四、继电保护的的任务

为防止电力系统事故的发生，我们希望所设置的继电保护的基本任务是：

1、当电力系统出现故障时，继电保护装置应能自动地、快速地、有选择性地将故障元件从系统中切除，使故障元件免遭损坏，保证系统其它部分继续运行。

2、当系统出现了不正常工作状态时，继电保护能及时反应，并发出信号，告诉值班人员予以处理。在无值班人员的情况下，保护装置应能延时减负荷或跳闸。

可见，归结起来，继电保护在电力系统的主要作用是：预防事故或缩小事故范围。

子项目二 对继电保护的基本要求

根据继电保护在电力系统中所担负的任务，继电保护装置必须满足以下四个基本要求，即选择性，速动性，灵敏性和可靠性。

一、选择性

1.概念 :所谓选择性是指继电保护动作时 ,只能把故障元件从系统中切除 ,使系统的无故障部分继续运行。

2.获得选择性的前提条件：凡是有断路器的地方必须装设继电保护装置。例如在如图 1-1 为单侧电源电网图中，1DL ~ 7DL 处均装设了继电保护装置。

3.获得选择性的途径：离故障点最近的保护动作。例如在图 1-1 所示的电网中，当 d_1 点短路时，应该由保护 1、2 动作； d_2 点短路时，应由保护 6 动作； d_3 点短路时，应由保护 5 动作。

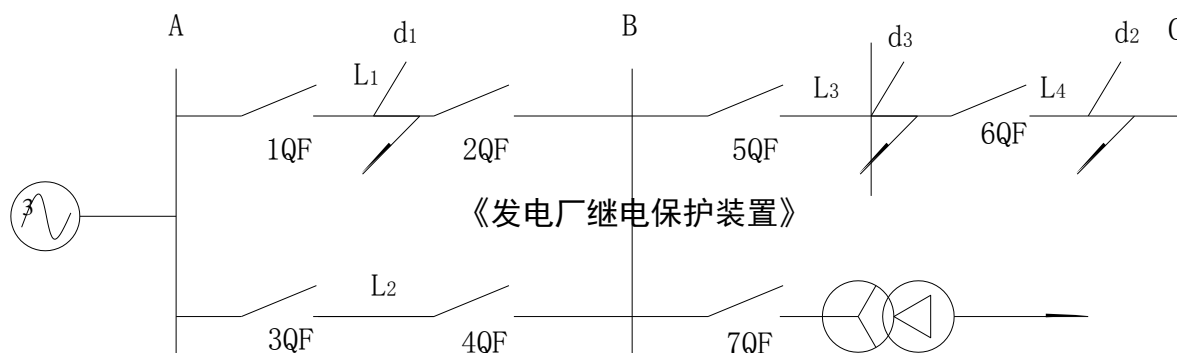


图 1-1

4.必须指出，继电保护装置和断路器都可能因失灵而拒动。因而，在装设继电保护装置时，一般都不止装设一种，应该装两种以上，即有主保护和后备保护。

1) 主保护：是指装设在本元件断路器处并瞬时动作的保护。我们一般都希望故障能够被主保护动作切除。据我国某系统统计最近十年中 220KV 线路的主保护动作次数占全部保护动作次数的 83.7%，154KV 线路主保护动作次数占 76.3%。

2) 后备保护：后备保护可分为远后备两种。

①近后备：装设在本元件断路器处，动作时限比主保护长。当本元件主保护拒动时，才由近后备保护动作来切除故障。

②远后备：装设在相邻上一元件断路器处，动作时限比近后备保护时限还要长。当本元件的保护或开关拒动时，利用相邻元件的远后备保护切除故障。

3) 辅助保护：起辅助作用的保护。如为消除方向继电器的电压死区或为加速切除靠近母线附近的线路故障而加装的电流速断保护。

二、灵敏性

1.概念：继电保护装置对于保护范围内的故障应有足够的反应能力，不论故障点的位置和故障的性质如何，都能敏感地作出反应，即具备足够的灵敏性。

2.作用：评价一套保护的可行性，通常用灵敏系数（灵敏度） K_L 来衡量。定义如下：

$$K_L = \frac{\text{《发电厂继电保护装置》}}{\text{保护范围规定点金属性短路时继保中的故障量值}} \times \text{保护装置的动作量值}$$

1) 对反应故障参数量值增大的保护

2) 对反应故障时参数量值降低的保护

四、可靠性

1.概念：继电保护的可靠性是指：保护在应该动作时，不拒动；而在不应动作时，不误动的性能。

2.获得可靠性的途径：保护装置越简单越可靠。

五、四“性”的相互关系

相互统一，相互矛盾。

§ 3 作业

教材 P₆ 1-3 1-4 1-6

授课课次：2

【教学内容】项目一 继电保护基础元件的全过程认识

子项目三继电保护的组成及其基本工作原理；参观继电保护现场设备。

【教学目的】通过教学和参观，使学生掌握继电保护的组成和工作原理，增加对继电保护装置的感性认识。

【教学重点】继电保护的组成和工作原理。

【教学难点】常用继电器图形符号的识记。

【教学过程】

复习回顾及提问

- 1.电力系统继电保护的基本任务？
- 2.对继电保护的基本要求是什么？
- 3.基本要求之间的相互关系？并举例说明。

项目一 继电保护基础元件的全过程认识

子项目三继电保护的组成及其基本工作原理

一、继电保护装置一般是由测量部分，逻辑部分和执行部分组成。

二、继电保护的基本工作原理

测量部分测量被保护组件运行参数，并与整定值相比较，以判断被保护组件是否发生故障。如果运行参数达到或超过（或低于）整定值，测量部分向逻辑部分发信号，并起动保护装置。逻辑部分接受测量部分的信号后，按照规定的逻辑条件，判断保护装置是否动作于跳闸或动作于发信号，执行部分根据逻辑部分送来的信号而动作。

参观模拟电站继电保护装置

- 一、了解常规发电机、变压器、线路保护装置的种类及组成等；
- 二、了解微机保护的基本组成；
- 三、观察继电保护动作后的现象。

§ 3 作业

教材 P6 1-10

授课课次：3

【教学内容】项目一 继电保护基础元件的全过程认识
子项目四互感器、测量变换器 and 对称分量过滤器。

【教学目的】通过教学，使学生掌握互感器、测量变换器和对称分量过滤器在继电保护中的应用。

【教学重点】互感器的极性、工作特点、误差等；测量变换器的作用、工作原理；对称分量过滤器的工作原理。

【教学难点】影响转移阻抗大小的因素及电抗变换器磁化曲线的影响与补偿；用相量法分析对称分量过滤器的工作原理。

【教学过程】

复习回顾及提问

1. 电力系统继电保护的基本组成及其工作原理？
2. 电力系统继电保护动作后的现象有哪些？

子项目四 互感器

一、概述

互感器是用来联系电气一次与电气二次的组件。互感器分为电压互感器（TV、YH、PT）和电流互感器（TA、LH、CT）两种，YH的二次额定电压为100V，LH的二次额定电流为5A或1A。LH、YH使用过程中，LH二次不

允许开路，YH 二次侧不允许短路，且二次绕组与铁心要可靠接地。

二、继电保护互感器的极性和一、二次电气量的正方向

(一) 继电保护用互感器的极性表示

通常用 L1 与 K1、L2 与 K2 分别表示一、二次绕组的同极性端子，如只需标出相对极性关系时，也可以在同极性端标以“。”号

(二) 继电保护用互感器一、二次量正方向规定

1、互感器的一次电气量(电压、电流)的正方向规定为从“。”端指向无“。”端。

2、互感器的二次电气量正方向规定为：PT 与一次相同，CT 与二次相反。

三、继电保护用电流互感器的选择与校验

(一) 理想情况下的电流互感器

此时，励磁电流为零。于是根据变压器磁势平衡原理

$$\dot{I}_1 W_1 - \dot{I}_2 W_2 = 0$$

因而

$$\dot{I}_2 = W_1 \dot{I}_1 / W_2 = \dot{I}_1 / n_1 = \dot{I}_1$$

(二) 实际中的电流互感器

1、实际中，励磁电流是存在的，使得 $\dot{I}_2 \neq \dot{I}_1$ ，因而出现了电流互感器的误差，误差可分为：

(1) 电流误差(变比误差)：CT 一、二次电流大小的误差。用 f_1 表示，即： $f_1 = \frac{I_2 - I_1'}{I_1'} \times 100\% = \frac{\Delta I}{I_1'} \times 100\%$

$$I_1' \quad I_1'$$

(2) 角度误差 δ ：一、二次电流相位的误差。

2、误差的影响因素

(1) 电流互感器的二次负载阻抗 Z_{fh}

(2) 一次电流倍数 m 。

图 2-1 示出二次电流 I_2 与 m 之间的关系：

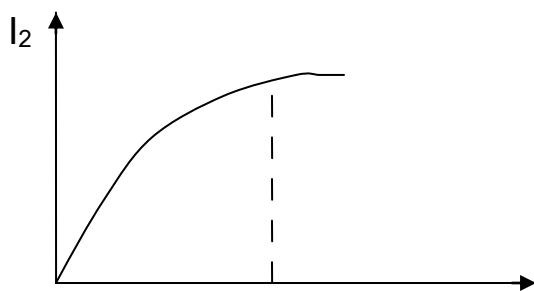


图 1-1

(三) 电流互感器的校验

1、对于继电器的保护用电流互感器，要求其变化比误差不超过 10%，角度差不超过 7%。

所谓 10%误差曲线，是指 CTf_i 为 10%， δ 不超过 7° 时，饱和电流倍数 m_{10} 与允许负载阻抗 Z_{fh} 之间的关系曲线。

2、对于校验不合格的电流互感器的解决办法。

- a. 换用其他类型的电流互感器；
- b. 用两个同类型的电流互感器串联。

子项目五 测量变换器

一、测量变换器的作用

对于晶体管继电器和微机保护中，必须采用变换器，将互感器的二次电气量变换后才能应用。测量变换器的作用有：

1. 电路的隔离
2. 电量的变换
3. 定值的调整
4. 比较电压的综合
5. 抑制谐波分量

二、测量变换器的分类

常用的测量变换器有电压变换器 (YB)、电流变换器 (LB) 和电抗变换

器 (DKB) 等三种。它们的原理图见教材 P9 图

三、各种变换器的工作特性

上述各种变换器虽然作用有所不同，但他们的基本构造是相同的，都是在铁芯构成的公共磁路上绕有数个通过磁路而耦合的绕组，因而他们的等效电路结构都是相同的，如图 1-2 所示：

但是，当它们本身参数与电源参数及负载参数的相对关系改变电，将表现出不同的特性，即所谓变换器按电压变换器方式工作、或按电流方式或按电抗变压器方式工作。三种变换器的比较见教材 P₁₀ 表 1-1。

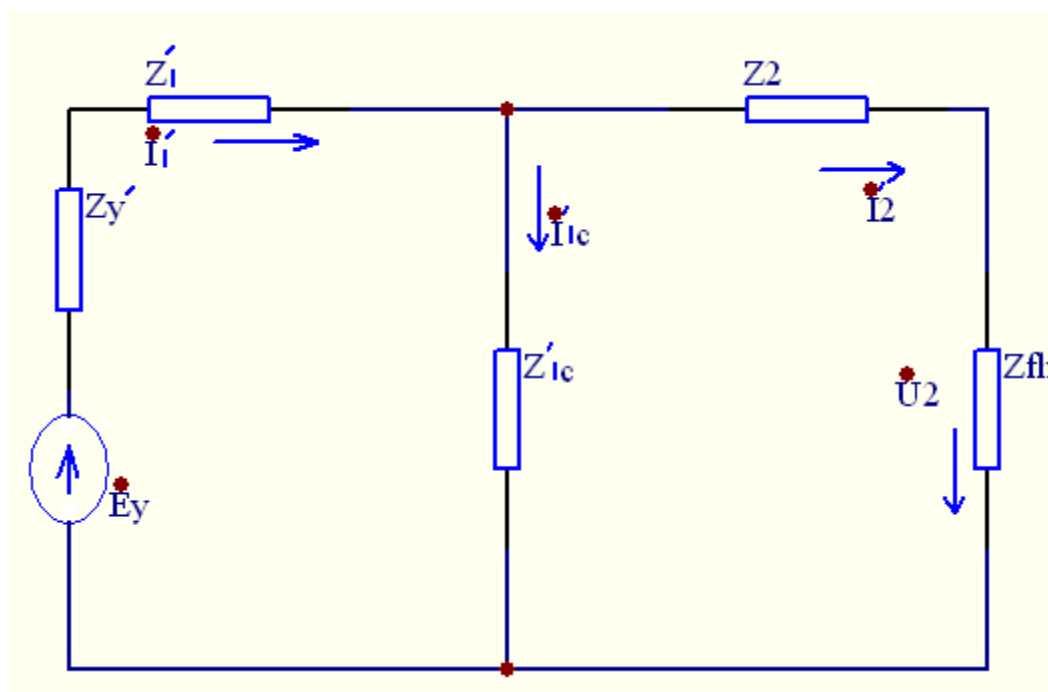


图 1-2

(一) 电压变换器 (YB)

对电压变换器的要求是：变换器 (及所接二次负载) 的接入不影响所接处的电压值；输出二次电压与一次电压成比例，同时所接二次负载大小无关，即 $U_2 = KU_1$, K 为实常数。

参见图 1-2，当忽略漏阻抗时，只要满足下列条件，变换器就按 YB 方式工作：

$$\begin{cases} Z_{ic}' \gg Z_{y'} \\ Z_{fh} \gg Z_{y'} \end{cases}$$

(二) 电流变换器 (LB)

对电流变换器的要求是：变换器（及所接的二次负载）的接入不影响电路的电流值；输入二次电流与一次电流成正比，与所接二次负载大小无关，即 $I_2 = KI_1$ ，K 为实常数。

参见图 1-2，当忽略漏电阻时，只要满足下列条件，变换器就按 LB 方式工作：

$$Z_{fh} \ll Z_{y'}$$

(三) 电抗变换器 (DKB)

对电抗变换器的要求是：电抗变换器（及所接二次负载）的接入不影响电路的电流值；输出二次电压与一次电流大小成正比，并且相位差为一定值，与二次负载大小无关，即

$$U_2 = Z_b I_1 = |Z_b| \angle \Phi_b I_1 = KI_1$$

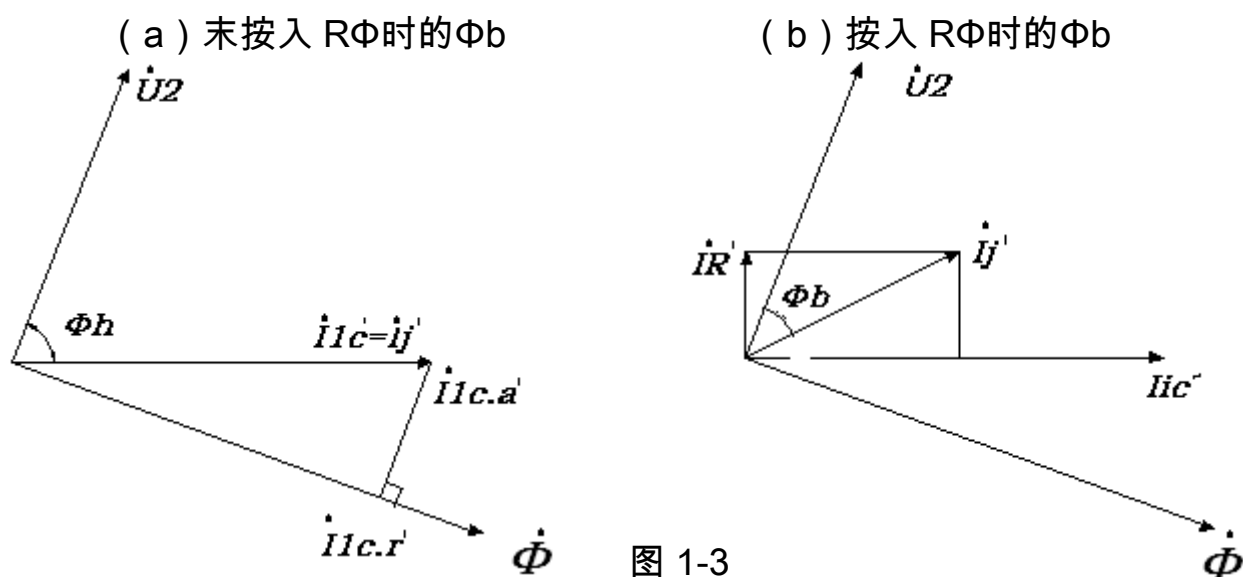
式中 Z_b 称为转移阻抗， Φ_b 称为转移阻抗角。

电抗电压器应具备的条件是

$$\begin{cases} Z_{ic}' \ll Z_{y'} \\ Z_{ic}' \ll Z_{fh} \end{cases}$$

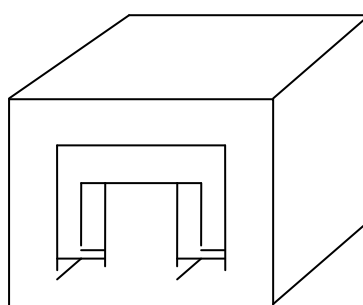
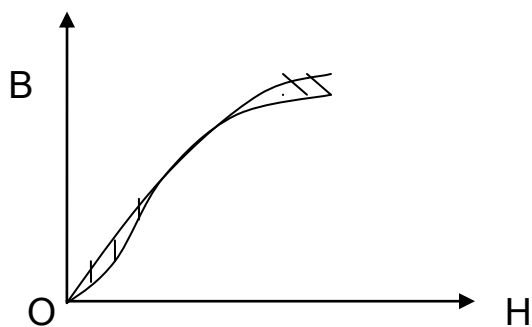
电抗变压器上工作状态较特殊的一种变压器：一方面是它的电流源（即工作于电流源），这一点与电流变换器相同。另一方面，其二次接近于开路状态，输出的是电压，这一点与电压变换器相同。

在继电保护装置中，广泛采用电抗变换器，并且要求二次电压与一次电流之间有可调整的相位角。为了改变 Φ_b ，一般在附加二次绕组上接入可调整的固定负载比阻 $R\Phi$ ，见教材 P₁₀ 图 2-7 调整原理如图 2-3 所示意：



但是，应当指出，当改变 $R\Phi$ 的大小时，转移阻抗也在改变，为维持转移阻抗大小不变，须采取相应的措施。

电抗变压器的线性变换，有赖于铁芯磁化曲线的线性，但是铁芯的磁化曲线如图 1-4 曲线 1 所示，为扩大铁芯的线性范围，可采用磁路补偿的方法，磁路补偿如图 1-5 所示，分两部分：一是插入磁线性 1 (玻莫合金)，三是移入的软铁片 2。



四 对称分量过滤器

继电保护的基本任务之一是发现被保护的系统或设备的故障状态，确定故障的位置，有时还要区别故障的类型。电力系统发生故障时根据故障状态的

不同，系统中会出现或瞬时出现电压和电流的不对称现象。现代继电保护常利用这个现象来发现故障，判断故障的位置和类型。

(一) 利用电压和电流出现的不对称来发现故障有如下优点：

1. 能避开负荷电流，从而可以提高保护的灵敏度。
2. 能避开系统振荡。
3. 能判断故障类型，因而容易确定保护的動作方式。
4. 可用单个测量组件实现三相保护，从而简化保构成。

由于以上优点，所以在复杂保护装置中，应用电流、电压中零序和负序分量的保护方式得到了广泛的应用。

反应对称分量的保护装置必须要用对称分量滤过器。

其作用是从系统电压和电流中滤出所需的对称分量，在继电保护装置中所用的对称分量滤过器有正序电压、电流滤过器，负序电压、电流滤过器，零序电压、电流滤过器，还有复合电压、电流滤过器。

(二) 零序电流滤过器

1、结构、原理接线：见教材 P₁₃ 图 2-11、2-12

2、原理分析：

流入继电器的电流

$$\begin{aligned} I_j &= I_a + I_b + I_c = 1n_1 [(I_A - I_{1C.A}) + (I_B - I_{1C.B}) + (I_C - I_{1C.C})] \\ &= 1n_1 (I_A + I_B + I_C) - 1/n_1 (I_{1C.A} + I_{1C.B} + I_{1C.C}) \\ &= 3I_0/n_1 - I_{bp} \end{aligned}$$

从理想条件讲,当系统发生接地短路时，三相电流出现了零序分量，滤过器才会有相应的 $3I_0/n_1$ 输出。但在实际工作中,由于三相流互的励磁电流不对称,即使一次系统没有发生接地短路即一次系统不存在零序分量时,滤过器也会有输出 I_{bp} 称不平衡电流.

(三) 零序电压滤过器

1. 结构、原理接线：见教材 P₁₃ 图 2-13

2. 原理分析

当系统发生接地短路时，滤过器输出电压为：

$$U_{LN}=U_a+U_b+U_c=1/n_y(U_A+U_B+U_C)=3U_0/n_y$$

一般示值为 100V.

值得指出的是:由于三相电压不完全对称,即使没有发生接地短路,滤过器也会有输出即 U_{bp} 为不平衡电压.

(四) 负序电压滤过器

1. 结构：广泛采用电阻、电容构成的单相式负序电压滤过器原理接线如教材 P₁₅ 图 1-15 (a) 示。

2. 原理分析：

滤过器保证参数

$$R_1=3^{1/2}X_{C1}, \quad R_2=3^{-1/2}X_{C2}, \quad R_1=X_{C2}$$

于是，滤过器的输出电压为

$$U_{mn}=U_{R1}+U_{C2}$$

因为滤过器输入电压为线电压,而线电压中是不含零序分量的,故讨论时不需考虑零序分量的输入问题.

1. 当输入正序电压时，有：

设 $U_{AB1}=U_{AB1}e^{j10}$, 则 $U_{BC1}=U_{BC1}e^{j-120}$, $U_{CA1}=U_{CA1}e^{j-240}$

$$\begin{aligned} U_{R1} &= I_{AB1}R_1 = U_{AB1}R_1 / (R_1 - jX_{C1}) \\ &= U_{AB1}e^{j10}R_1 / [(R_1^2 + X_{C1}^2)tg^{-1}(X_{C1}/R_1)] \\ &= U_{AB1}e^{j10}3^{1/2}X_{C1} / 2X_{C1}e^{-j30} \\ &= 3^{1/2}U_{AB1} / 2 \angle 30^\circ \end{aligned}$$

$$U_{C2} = I_{BC}(-jX_{C2}) = U_{BC1}(-jX_{C2}) / (R_2 - jX_{C2})$$

$$=U_{BC1}e^{-j120^{\circ}}(-jX_{C2})/[(R_2^2+X_{C2}^2)\text{tg}^{-1}(X_{C2}/R_2)]$$

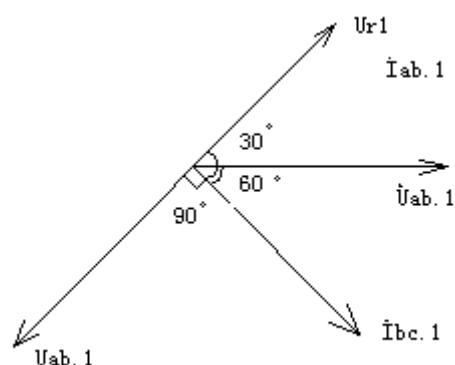
$$3^{1/2}U_{BC1}\angle-120^{\circ}X_{C2}\angle-90^{\circ}/2X_{C2}\angle-60^{\circ}$$

$$=3^{1/2}U_{BC1}e^{-j150^{\circ}}/2$$

$$=-U_{R1}$$

故 $U_{mn}=U_{R1}+U_{C2}=0$

同时，可作出电流、电压相量进行分析：



2. 当输入负序电压时

设 $U_{AB}=U_{AB2}e^{j0}$, 则 $U_{BC}=U_{BC2}e^{j120^{\circ}}, U_{BC2}=U_{AB1}$

$$U_{R1}=I_{AB2}R_1=U_{AB2}R_1/(R_1-jX_{C1})=3^{1/2}U_{AB2}e^{j30^{\circ}}/2$$

$$U_{C2}=I_{BC2}(-jX_{C2})=U_{AB2}e^{-jX_{C2}}/(R_2-jX_{C2})$$

$$=3^{1/2}U_{BC2}e^{j90^{\circ}}$$

$$\text{故 } U_{mn.2}=U_{R1}+U_{C2}=1.5U_{AB.2}e^{j60^{\circ}}$$

同样，可以作相量进行分析

五、负序电流过滤器

(一) 两电流变换器式负序电流过滤器

1、结构、原理接线图：可见教材 P16。

2、原理分析

电流变换器 L_{BA} 有两个一次绕组 : W_1 通入 $1A$, W_2 中通入 $-3I_0$, $W_1=3W_2$, 用以消除零序电流的影响.

L_{BC} 两个匝数相等的一次绕组 W_1, W_2 分别通入电流 I_n 和 $-I_c$, 可消除了零序电流的影响.

L_{BA} 二次侧的电阻 R , L_{BC} 二次侧电容 C , 且有 $R=3^{1/2}X_C$ 可以消除正序分量电流的影响.

1、输入正序电流时

$$\begin{aligned} U_{mn.1} &= U_{R1} + U_{C1} - I_{A1}R/n_A + [-j(I_{B1} - I_{C1})X_C/n_{BC}] \\ &= I_{A1}R/n_A - 3^{1/2}I_{A1}X_C/n_{BC} \end{aligned}$$

$$\text{取 } n_A = n_{bc} \text{ 时, } U_{mn.1} = 0$$

作相量图分析.

2、输入负序电流时

$$U_{mn.2} = U_{R2} + U_{C2} = 2U_{R2} = 2I_{A2}R$$

同样的可作相量图分析.

(二) 电流变换器—电抗变压器或负序电流滤过器由学生自己分析。

§ 6 P₂₉ 1-7

授课课次：4、5

【教学内容】 § 项目一 继电保护基础元件的全过程认识

子项目六 电磁式继电器。

【教学目的】通过教学，使学生掌握电磁式继电器的工作原理、作用和整定值调整办法。

【教学重点】电磁式继电器的基本工作原理及特点。

【教学难点】继电器的调试。

【教学过程】

复习回顾及提问

- 1.测量变换器的作用？
- 2.电压、电流、电抗变换器的工作特点？
- 3.电抗变换器是如何改变转移阻抗角的？
- 4.继电保护用的 CT 在选择时应注意什么？
- 5.对称分量滤过器的作用？
- 6.滤过器出现不平衡值的原因分别是什么？

子项目六 电磁式继电器

§ 1 电磁式继电器的基本工作原理

一、基本工作原理

利用电磁铁的铁心与衔铁间的吸力作用而工作的继电器。

二、基本组成

电磁铁、衔铁、线圈、触点、反作用弹簧及止档组成。结构示意图详见教材 P₁₇ 图 2-18 (讲授时用实物介绍)

三、原理具体分析

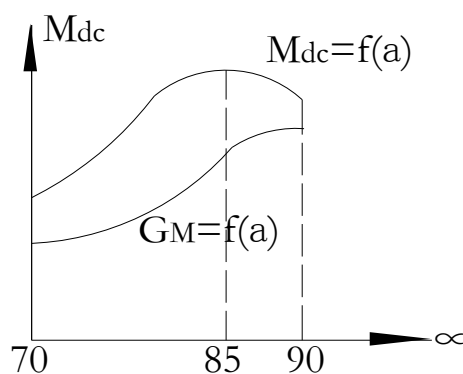
通入 $I_j \rightarrow \Phi$ (经铁心、衔铁、气隙闭合) $\rightarrow F_{dc}$ \rightarrow 继电器动作

根据电磁原理：

$$\Phi \propto F/R_m$$

因此有： $F_{dc} = K_1 \Phi^2 K_1 (I_j W_j / R_m)^2 = K_2 I_j^2$

继电器动作过程中， δ 减小， R_m 减小，若 I_j 不变，则 F_{dc} 增大，有利于继电器动作，是一正反馈过程。与此同时，电磁力矩 M_{dc} 在不断地增加。亦即，继电器动作过程中， M_{dc} 不是常数。如下图所示：



$$M_{dc} = 1/2 W_j^2 I_j^2 dG_m / d\alpha$$

式中：

G_m --- 磁导；

α ---舌片对水平位置角度。

四、基本术语

1、继电器的动作

M_{dc} 企图使舌片转动；与此同时，转轴上还作用着由弹簧产生的反抗力矩 M_t 和摩擦力矩 M_m ，只有当 I_j 所产生的 $M_{dc}=M_t+M_m$ 时，继电器才开始转动。

所谓继电器的动作是指继电器由释放状态改变至动作后状态的过程。

2、继电器的动作值

能够使继电器动作的最小(或最大)参数称为继电器的动作值。例如电流继电器等过量型继电器为最小值，电压继电器等低量型继电器为最大值。

3、继电器返回

继电器动作后，如减小 I_j ，继电器将在弹簧后作用下返回。在返回过程中，同样有 M_{dc}, M_t, M_m 三个力矩存在，这时 M_t 企图使舌片返回，而 $M_{dc}+M_m$ 企图阻止舌片返回，返回临界条件为：

$$M_t=M_{dc}+M_m$$

当 I_j 减小到一定数值满足上述条件时，继电器刚好能返回。

所谓继电器的返回是指继电器由动作后状态改变至释放状态的过程。

4、继电器的返回值

能够使继电器返回的最大(或最小)参数称为继电器的返回值。用 I_{hj} 表示。例如电流继电器等过量型继电器为最大值，电压继电器等低量型继电器为最小值。

5、返回系数

继电器的返回值与动作值之比称为返回系数，即

$$K_h=\text{返回值/动作值}$$

对于过量继电器： $K_h<1$ 。

对于欠量继电器： $K_h > 1$ 。

6、继电器的动作与返回特性

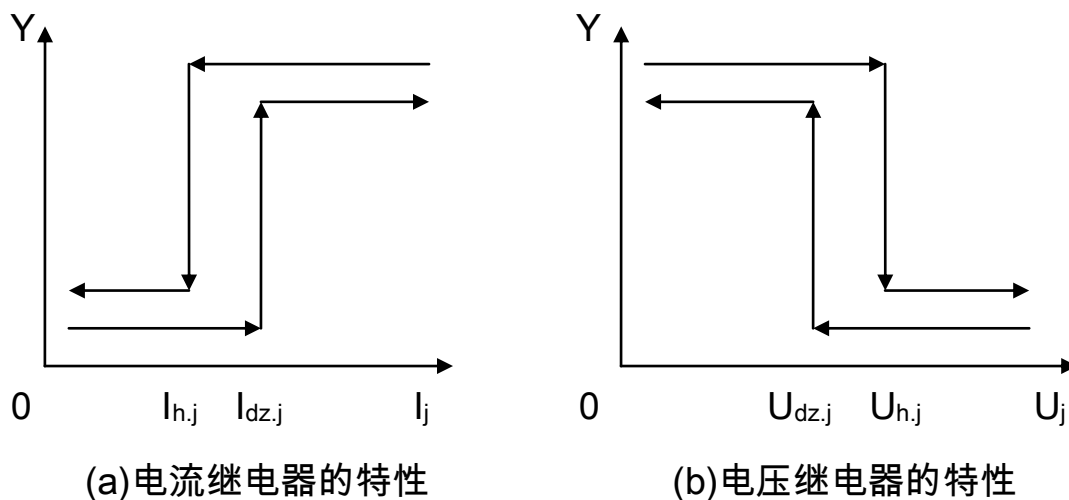
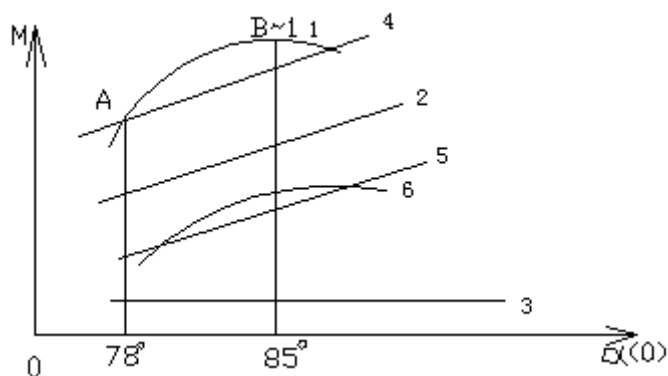


图 1-6 继电器的动作与返回特性

§ 2 各种常用电磁式继电器介绍

一、电流继电器 (LJ、KA)

- 1、作用：用作继电保护的测量元件，反应被保护元件的电流变化。
- 2、结构简介：用实物进行讲解。
- 3、动作特性分析



曲线 1： $M_{dc} = f(\alpha)$

曲线 2： $M_m = f(\alpha)$

曲线 3 : $M_m=f(a)$

曲线 4 : $M=M_t+M_m=f(a)$

曲线 5 : $M=M_t-M_m$

曲线 6 : $M_{dc}=f(a)$ (返回)

4、继电器整定值调整

10.改变弹簧力矩即调整把手，顺时针旋转把手，整定值增大，反时针则减小。

20.改变两个线圈的连接方式。线圈串联时 I_{dz} 为并联时的 1/2。

二、电压继电器(YJ、KV)

1、作用：用作继电器保护的测量元件，反应被保护元件的电压变化。

2、结构简介：应用实物进行讲解。

3、型号：过电压继电器以奇数结尾,如 DJ-121 等；低电压继电器以偶数结尾,如 DJ-122 等。

4、整定值调整：同 LJ。

三、时间继电器

1、作用：是一种辅助继电器，从激励量变化至规定值的瞬间起至继电器输出信号的瞬间止所经历的时间间隔为其动作时间。简而言之就是获得人为的延时。

2、结构简介：应用实物进行讲解。

3、整定值调整：旋转把手

四、中间继电器 (ZJ、KM)

1、作用：是一种辅助继电器，具体体现为：

①增加触点的数目;②扩展触点的容量;③获得一定的延时。

2、特殊的中间继电器---干簧继电器

干簧继电器是中间继电器中一种特殊形式的继电器，其结构示意图见教材 P₂₁ 图 1-15。

当线圈通电流后，产生磁通通过簧片，两簧片相吸触点接通，继电器动作；当线圈磁场减弱到一定程度时，簧片触点靠自身的弹力打开，继电器返回。

该继电器动作时所消耗的功率小,但容易出现触点粘住.

五、信号继电器 (XJ、KS)

- 1、作用：用来保持继电器或继电保护所处状态，并按通声、光信号电路。
- 2、注意事项

信号继电器必须靠人工手动才能复归,这是区别其它继电器的一点.

六、极化继电器

- 1、作用：在整流型保护中，广泛用作执行元件。如在中央音响信号系统中的冲击继电器、功率方向继电器等.
- 2、特点: ①动作具有方向性; ②动作消耗功率小.

§ 3 作业 P₂₉ 1-8 1-14

授课课次：6

【教学内容】 项目二 输电线路相间短路保护的设置与整定

子项目一瞬时电流速断保护

【教学目的】 通过教学，使学生掌握瞬时电流速断保护的工作原理、整定计算方法 and 优缺点。

【教学重点】 瞬时电流速断保护原理、整定计算及评价。

【教学难点】 最大、最小运行方式的理解。

【教学过程】

复习回顾及提问

- 1.继电器的动作、动作值、返回、返回值及返回系数？
- 2.各种常用继电器的作用？整定值调整方法？

项目二 输电线路相间短路保护的设置与整定

子项目一 瞬时电流速断保护

§ 1 线路保护概述

一、线路保护设置原理

输电线路正常运行时，线路上流过的是负荷电流，母线电压一般为额定电压。当线路发生相间短路时，短路电流增大，故障相母线电压会降低。因此，可利用这一特征来反应故障。线路电流达到或超过某一预先整定值时，电流继电器动作，就构成了线路的电流保护；当母线电压达到或低于某一预先整定值时，低电压继电器动作，就构成了线路的电压保护。

二、常见的线路保护

- 1、瞬时电流速断保护；
- 2、限时电流速断保护；
- 3、过电流保护；
- 4、电流电压联锁断保护。

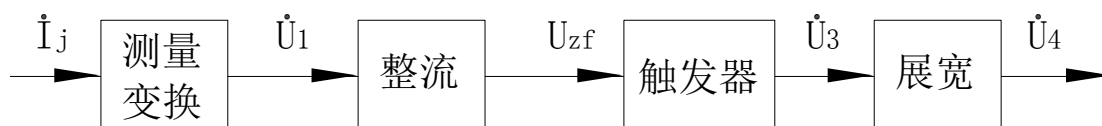
子项目一 瞬时电流速断保护

一、问题提出

根据对继电保护速动性的要求下，在简单扼要、可靠和保证选择性的前提下，在输电线路装设反应电流增大且瞬时动作的瞬时电流速断保护。

二、整定计算

以图 6-1 所示单侧电源辐射形电网为例进行说明：



现假定在线路 L1 和线路 L2 上分别装设了瞬时电流速断保护 1 和保护 2。

1、整定原则

动作电流按躲过本线路末端短路时最大短路电流整定，即

$$I_{dz} = K_k I_{d.max}$$

式中： I_{dz} —一次动作电流；

K_k —可靠系数；

$I_{d.max}$ —最大运行方式下，被保护线路末端变电所母线上三相短路电流，一般取 $t=0s$ 时电流周期分量的有效值。

2、 $I_{d.max}$ 的确定

$$I_{d.max} = E_{xt} / (X_{xt.min} + X_1 l_d)$$

式中： E_{xt} —系统等效电源的相电势；

$X_{xt.min}$ —归算至保护安装处网络电压的系统最小等效电抗；

X_1 —线路单位长度的正序电抗；

l_d —短路点至保护按装处的距离。

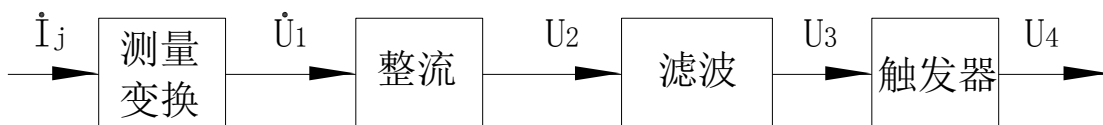


图 2-2

当系统运行方式一定时， E_{xt} 、 X_{xt} 一定时，此时 $I_{d.max} = f(l_d)$ 。图 2-2 为图 2-1 中的保护的整定计算过程，保护 1 在最大运行方式下保护范围为 l_{max} ，在最小运行方式下保护范围为 l_{min} 。关于最大运行方式和最小运行方式的选取，应视保护安装地点、网络实际情况而定。一般情况下，同一点三相短路电流大于两相短路电流，当 $X_{1\Sigma} = X_{2\Sigma}$ 时， $I_d^{(2)} = \sqrt{3}/2 I_d^{(3)}$ ，故最大运行方式下，三相短路电流最大；最小运行方式下，两相短路电流最小。

3、保护灵敏度校验

根据保护范围是否在允许范围之内来判断保护的可行性，

1> 最大保护范围

$$l_{\max} = 1/x_1(E_{xt}/I_{dz} - X_{xt.\min}) \geq 50\%l$$

2> 最小保护范围

$$l_{\min} = 1/x_1(3E_{xt}/2I_{dz} - X_{xt.\max}) \geq 15\%l$$

4、注意：瞬时电流速断保护范围一般只限于本线路范围内，不得延伸至变压器内部，即整定时可按变压器二次母线短路电流计算。

三、原理说明

原理接线图详见教材 P₃₂ 图 2-2。

1⁰.图中组件作用说明：

a、中间继电器 ZJ：1.扩大触点容量；2.增大保护的固有动作时间，从时间上躲过避雷器放电时间。

b、信号继电器 XJ：在整套保护动作后，指示并记录该套保护的動作，以便运行人员根据保护的動作情况，对故障进行分析。

c、断路器辅助常闭触点 DL₁：借助其大容量来接通或切断大电流。

d、电流继电器 LJ：测量元件，反应电流的变化。

2⁰.动作过程说明

当线路中发生短路时，电流增大，LJ 起动，此时，LJ 动作，使常开触点闭合，ZJ 线圈带电动作，从而使 ZJ 的常开触点闭合，其触目一方面经过 DL₁ 去跳闸，另一方面启动 XJ，信号继电器掉牌，发信号。

3⁰.展开原理图参见教材 P₄₁ 图 2-15。

a) 保护性能评价

动作迅速，简单可靠，但不能保护本线路的全长，故不能单独使用，而且它的保护范围随运行方式的变化而变化。当运行方式变化很大、被保护的线

路很短时，甚至没有保护区。

§ 3.作业

P₅₄ 2-3

授课课次：7

【教学内容】限时电流速断保护；定时限过电流保护。。

【教学目的】通过教学，使学生掌握限时电流速断保护和定时限过电流保护的工作原理、整定计算方法和优缺点。

【教学重点】限时电流速断保护和定时限过电流保护的配置原则、工作原理、整定计算及灵敏度校验。

【教学难点】深入理解限时电流速断保护和定时限过电流保护选择性获得方法；保护时限特性与最大负荷电流的确定。

【教学过程】

复习回顾及提问

1. 瞬时电流速断保护的整定原则？
2. 瞬时电流速断保护的作用及优缺点？
3. 瞬时电流速断保护原理接线图的几个注意问题？

§ 1 限时电流速断保护

一、问题提出

瞬时电流速断保护能很好地满足“速动性”要求，但是其保护范围不够理想，特别是当系统运行方式变化较大时，实际保护区很短，甚至没有。那么为了提高保护的“可靠性”，即提高保护范围，同时兼顾动作的“速动性”，我们提出了一种新的线路保护——限时电流保护。俗称II段保护。

二、限时电流速断保护的工作原理

简单的说，提高限时电流速断保护的保护区，就是要求该保护能够保护线路的全长，其获得途径势必降低保护动作电流值。这样做的结果，保护区扩大了，同时也存在一个问题，保护区可能延伸到相邻线路的首端，引起保护失去选择性。为保证保护的选择性，一方面将动作电流值降低，另一方面使该保护带有一定的延时。我们把这种带有一些延时的电流速断保护称作限时电流速断保护，通常用符号 $\boxed{\text{II}}$ 表示。

三、整定计算

以图 7-1 为例，说明该保护动作电流、动作时限整定方法：

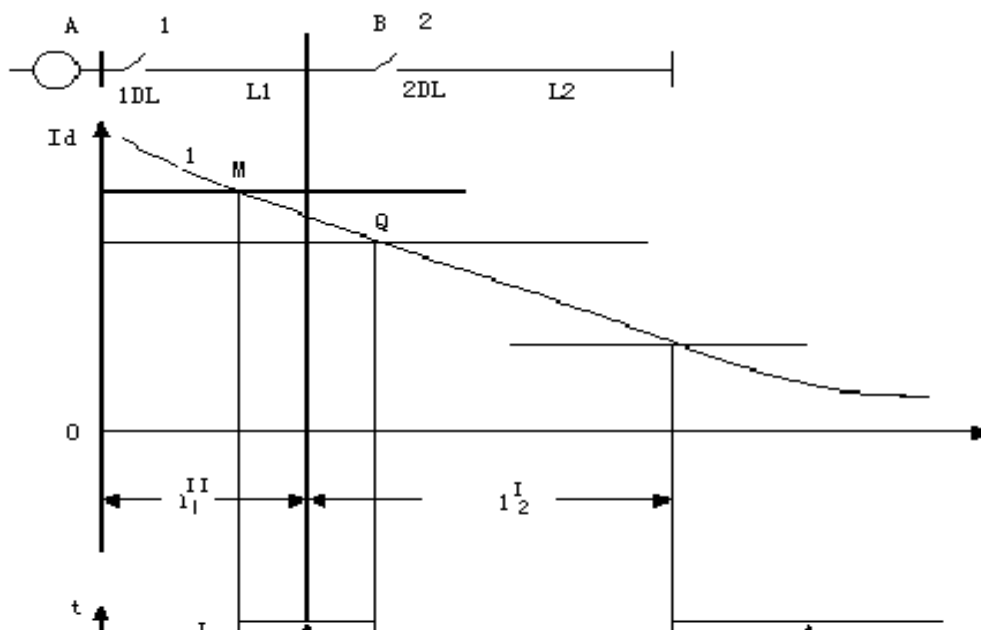


图 2—6

(一) 动作电流

限时电流速断保护的保护区不超过相邻下一线路瞬时电流速断保护区。因此，其动作值要根据相邻下一线路瞬时电流速断保护动作值整定，即：

$$I_{dz.1}^{II} = K_k^{III} I_{dz.z}^{I}$$

K_k^{III} —可靠系数，一般取 1.1 ~ 1.2。

(二) 动作时限

为保证选择性，限时电流速断保护只能作为相邻下一线路的后备保护，这样，其动作时限应与相邻下一线路的瞬时电流速断保护动作时限配合整定，即

$$t_1^{II} = t_2^{I} + \Delta t$$

式中： Δt —时限差。在保证选择性前提下， Δt 应越小越好， $\Delta t = t_{DL} + T_{zz} + T_{R1} + t_y$ ，一般值为 0.35 ~ 0.65s，通常取 $\Delta t = 0.5s$ 。而且，通常情况下， $t_2^{I} < 0.1s$ ，故常认为 $t_2^{I} = 0s$ ，这样限时电流速断保护动作时限 $t_1^{II} = 0.5s$ ，其符号可表示为

二、灵敏度校验

为了使限时电流速断保护在最小运行方式下两相短路时可靠地保护本线路的全长，应以被保护线路末端作为灵敏系数校验点，即

$$K_{lm} = I_{d.b.min}^{(2)} / I_{dz.1}^{II}$$

式中： $I_{d.b.min}^{(2)}$ —本线路末端最小运行方式下两相短路时的短路电流。

$I_{dz.1}^{II}$ —本线路的限时电流速断保护的動作电流。规程要求： $K_{lm} \geq 1.3 \sim 1.5$ 。

如果说 $K_{lm} \leq 1.3 \sim 1.5$ ，限时电流速断保护动作电流可根据相邻下一线路的限时电流速断保护相配合，即

$$I_{dz.1}^{II} = K_K^{III} I_{dz.2}^{II}$$

同时，动作时限也应与相邻下一线路的限时电流速断保护相配合。即

$$t_1^{II} = t_2^{II} + \Delta t$$

三、原理接线图

与瞬时电流速断保护相对照，多了一个 SJ，依靠它来获得保护的動作时限。

四、评价

与瞬时电流速断保护相对照：

优点：1.灵敏系数高 2.保护范围大

缺点：只能较好地作为本线路的近后备保护，不能完全作邻下一线路的远后备保护。

§2 定时限过电流保护

一、问题提出

限时电流速断保护虽然能比瞬时电流速断保护范围。但作为相邻下一线路的后备保护（即远后备）来说，灵敏性、可靠性都不是很高。为了保护的进一步完善，有待加强后备保护的配置。于是，我们提出了一种新的线路保护——定时限过电流保护。

二、定时限过电流保护的工作原理

定时限过电流保护是按其動作电流躲过线路最大负荷电流整定的一种保

护，其动作电流值较小，依靠保护动作时限的整定来获得选择性。该保护通常用符号 I_{dz} 表示。其动作电流值只能起到区分正常与短路两种不同的运行状态，而不能起到选择性作用，该保护的选择性获得是依靠动作时限的整定来获得的。

三、整定计算

(一) 动作电流的整定

1、按躲过线路最大负荷电流来考虑，则

$$I_{dz} > K_{zq} I_{fh.max} \quad (2-1)$$

式中： $I_{fh.max}$ ——没有考虑电动机起动时，线路输送的最大负荷电流；

K_{zq} ——考虑电动机自起动使电流增大的自起动系数，其值大于 1。

应按网络的具体接线及负荷性质确定，一般取 1.5 ~ 3.0。

2、区外短路切除后，电流继电器应能可靠返回。如图 2-1 所示为区外短路后过电流保护应返回的情形，对于这种情形，为确保电流继电器可靠返回应有

$$I_h > K_{zq} I_{fh.max} \quad (2-2)$$

综合式 (2-1)、(2-2)，由于 $I_h < I_{dz}$ ，当满足式 (2-2) 的话，则式 (2-1) 必然满足式，于是将式 (2-2) 改写成下面的等式：

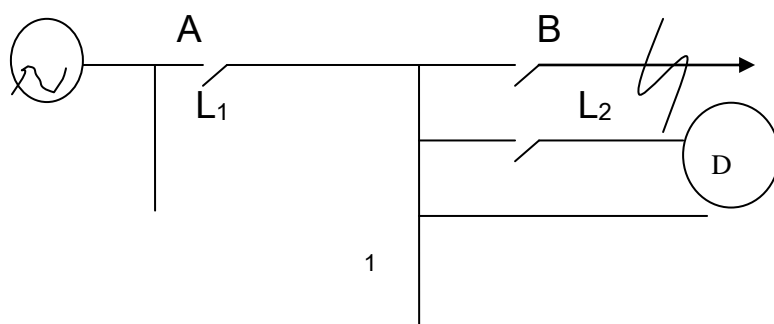


图 2—11

$$I_h = K_k K_{zq} I_{fh.max}$$

计及 $K_h = I_h / I_{dz}$

则

$$I_{dz}^{III} = K_k^{III} K_{zq} I_{fh.max} / K_h$$

式中： K_k^{III} ——可靠系数，考虑电流继电器整定误差及负荷电流计算不准确因素，一般取 1.15 ~ 1.25。

K_h ——返回系数，电磁型继电器取 0.85，晶体管取 0.9。

3、最大负荷电流 $I_{fh.max}$ 的确定说明

所谓最大负荷电流是指在负荷状态下，流过保护的最大电流。因此，在确定 $I_{fh.max}$ 时，除考虑负荷本身处于最大值外，还需要考虑网络接线变化时，流过保护的电流增大情况。

举例说明：双回线及备用电源自动投入线路。

(二) 动作时限的整定

为了保证选择性，任一线路过流保护的動作时限，必须与该线路末端变电所有出线保护動作时限最长者配合，如图 2-2 所示，则有

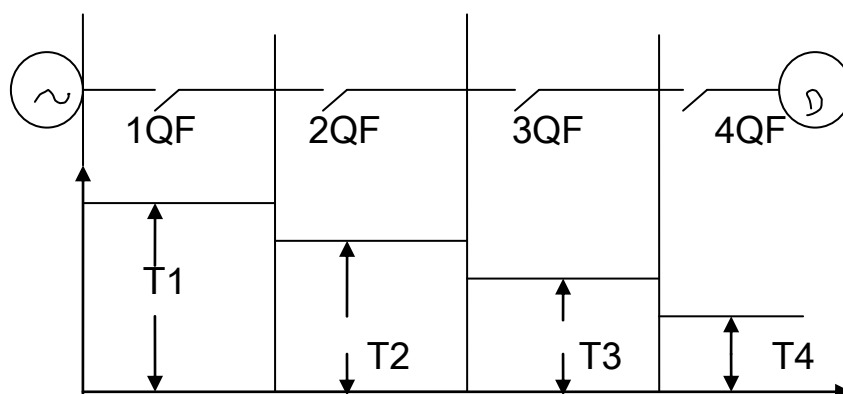


图 2—2

实际整定过程中，最末端的线路保护动作时限 t_4 取 0.5S， Δt 一般取 0.5s。

三、灵敏系数校验

校验公式： $K_{lm} = I_{d.min}^{(2)} / I_{dz}^{III}$

1.作为近后备时： $I_{d.min}$ 为本线路末端最小的运行方式下两相短路电流值。规程要求： $K_{lm} \geq 1.3 \sim 1.5$ 。

2.作为远后备时： K_{lm} 为相邻下一线路末端最小运行方式下两相短路电流值。规程要求 $K_{lm} \geq 1.2$ 。

四、原理接线图

与限时电流速断保护原理图一致。

§ 3 作业

P₅₅ 2-8 P₅₆ 2-10

授课课次：8

【教学内容】 电流保护的接线方式。

【教学目的】 通过教学，使学生掌握各种电流保护接线方式的特点和适用范围等。

【教学重点】 电流保护接线方式的种类，各种接线方式的特点及应用情况。

【教学难点】 两相不完全星形接线特殊故障情况下的保护工作行为及两相电

流差接线方式接线系数的分析。

§0 复习回顾及提问

1. 为什么要装设限时电流速断保护？
2. 限时电流速断保护的整定计算原则？
3. 限时电流速断保护的优缺点分析？
4. 为什么要设置过电流保护？
5. 过电流保护的工作原理？
6. 过电流保护的整定原则？

§1 电流保护接线方式概述

一、概念

所谓电流保护的接线方式就是指保护中电流继电器线圈与电流互感器二次线圈的连接方式。

二、分类

常用的相间短路电流保护接线方式有四种：

- 1、三相完全星形接线方式，参见教材图 2-9 (a)
- 2、两相不完全星形接线方式，参见教材图 2-9 (b)
- 3、两相三继电器接线方式，参见教材图 2-9 (c)
- 4、两相电流差接线方式，参见教材图 2-9 (d)

三、研究目的

主要研究流入电流继电器的电流 I_j 的大小与电流互感器二次电流 I_2 间的大小关系，即

$$K_{jx} = I_j / I_2$$

式中 K_{jx} —接线系数

因而前面所学的已知保护动作电流 I_{DZ} 后，求电流继电器的动作电

流，即

$$I_{dz,j} = K_{jx} I_{DZ} / n_{LH}$$

§ 2 常用电流保护接线方式分析

一、三相完全星形接线

1、特点：能反应各种相间短路和中性点直接接地电网中的单相接地短路。

K_{jx} 始终等于 1，能提高保护可靠性和灵敏度。

2、应用范围：广泛应用于发电机、变压器等大型贵重电气设备的保护中及大电流接地电网系统中输电线路的电流保护中。

二、两相不完全星形接线

1、特点：较三相完全星形接线简单、经济，能反应相间短路，但不能反应未装设电流继电器和互感器相应相发生的单相接地短路。 K_{jx} 始终等于 1。

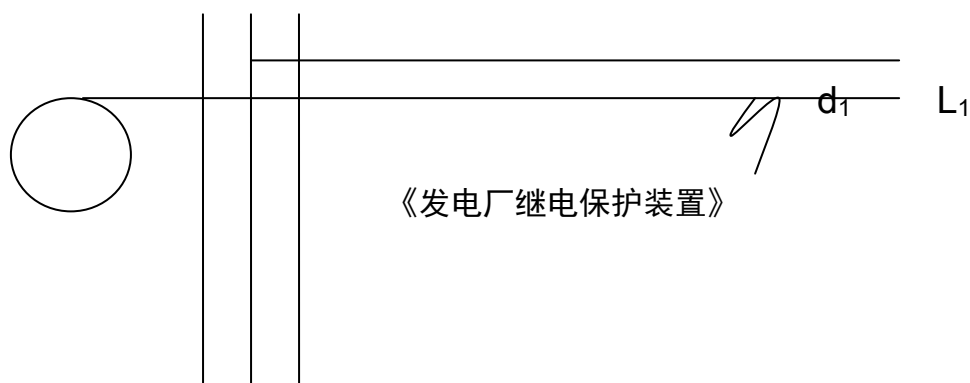
2、应用范围

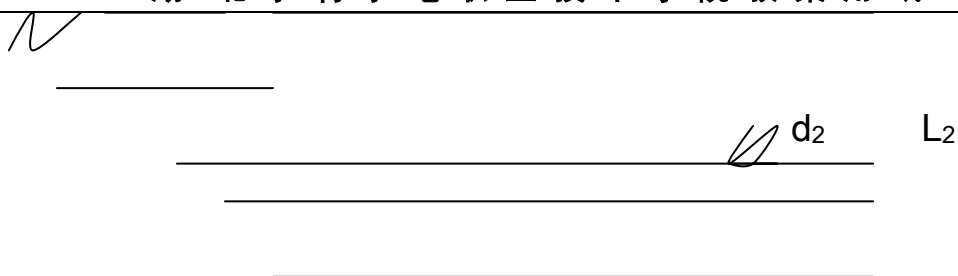
与三相完全星形接线基本类似，广泛用于小电流接地电网中输电线路的电流保护。

3、特殊故障情况下保护工作行为分析

(1) 两点接地短路时

1) 在小电流接地电网中，不同地点，不同相别发生两点接地短路，如教材图 2-12 所示，为提高供电可靠性，要求只切除一个故障点。但如果采用三相完全星形接线，则线路 L1 和 L2 可能同时被切除：若采用两相不完全星形接线，且两条线路的电流互感器都装在同名相上（A、C 两相），则可以保证有 2/3 的机会只切除一个故障线路。





不同故障相别组合时保护动作情况

线路 1 故障相	A	A	B	B	C	C
线路 2 故障相	C	B	A	C	B	A
保护动作情况	2	1	1	1	1	2

2) 在教材 P29 图 2-13 所示串联线路上，如果两条线路电流保护都采用三相完全星形接线时，保护将能保证选择性；如果两条线路电流保护都采用两相不完全星形接线时，将发生保护无选择性动作。

综上所述，在小电流接地系统中，如果输电线路采用并联运行方式时，电流保护应用两相不完全星形接线比三相完全星形接线优越，但如果输电线路采用串联运行方式时，则电流保护应用三相完全星形接线比两相不完全星形接线优越。

(2) Y, d11 接线变压器后发生两相短路时

如教材 P39 图 2-14 (a) 所示网络中，线路 L1 上发生 AB 两相短路时，装于变压器电源侧的过电流保护将作为后备保护。通过分析一下原边、副边短路电流可以看出：副边只有 A、B 两相有短路电流，而原边 A、B、C 三相都有短路电流，且 B 相短路电流为 A、C 相短路电流的一半。在两相不完全星形接线方式下，正好不能反应 B 相短路电流，这样就不能实现保护灵敏度最大化。

三、两相三继电器接线

1、特点

为了克服两相不完全星形接线在 Y,d11 变压器后发生两相短路时灵敏系数低而提出的。

2、第三个电流继电器反应的电流为

$$I_j=(I_A+I_C)/n_1=-I_B/n_{LH}$$

四、两相电流差接线

1、特点

(1) 只需用一个电流继电器，流入电流继电器的电流值

$$I_j=(I_A-I_C)/n_{LH}=I_a-I_c$$

(2) 接线系数与短路类型和相别有关

1) 正常运行和三相短路时： $K_{jx}=\sqrt{3}$

2) AC 两相短路时： $K_{jx}=2$

3) AB 或 BC 两相短路时： $K_{jx}=1$

2、应用时(整定计算)注意问题

(1) 整定时应引入 $K_{jx}=\sqrt{3}$

(2) 校验时应引入 $K_{jx}=1$

(3) Y,d11 接线变压器电源侧的电流保护不能采用该接线方式。

§3 作业

P₁₀₉ 2-14

授课课次：9

【教学内容】 电流电压速断保护。

【教学目的】 通过教学，使学生掌握电流电压联锁速断保护工作原理、整定

计算原则及灵敏系数校验等。

【教学重点】 电流电压联锁速断保护工作原理、整定计算原则及灵敏系数校验、原理图识图。

【教学难点】 整定计算与识图。

【教学过程】

§ 0 复习回顾及提问

1. 什么是电流保护的接线方式？
2. 电流保护接线方式的种类及特点？

§ 1 电压速断保护

一、问题提出

前已述及，瞬时电流速断保护虽然能作为输电线路主保护，但一般不能保护线路全长，特别是当系统运行方式变化很大时，其保护范围很小，甚至没有。当瞬时电流速断保护灵敏度不满足要求时，从而提出了新的保护方式——电压速断保护。

二、工作原理

电压速断器保护是利用“当线路发生短路时，母线电压下降很大”这一特征来设计的，当母线电压下降到整定的数值时，低电压继电器的常闭合，作用于跳闸，瞬时切除故障，该保护通常以符号 U 表示。

三、整定计算

动作电压 U_{dz} 按躲过最小运行方式下线路末端变电所母线上短路时，保护安装处母线的残压 $U_{cy.min}$ ，即

$$U_{dz} = U_{cy.min} / K_k$$

式中 K_k ——可靠系数，取 1.1 ~ 1.2

图 10-1 示意性的表示电压速断保护的整定及其保护范围：

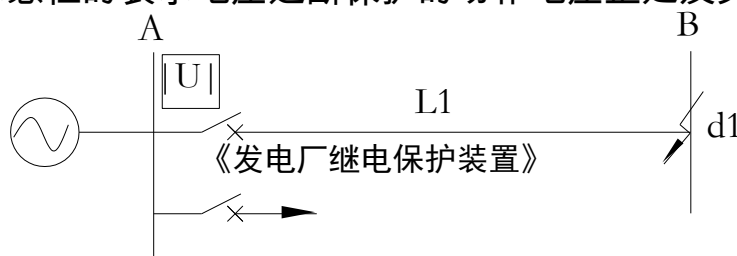


图 2-15

曲线 1、曲线 2 分别为系统最小运行方式和最大运行方式下线路各点短路时，保护安装处母线 A 的残余电压曲线。

§ 2 电流电压联锁速断保护

一、问题的提出

电压速断保护简单、经济，保护范围大，动作迅速，但由于母线上出线不只一回时，当其中一回线路上发生短路时，母线上的电压下降，所有出线的电压速断保护均要起动，使保护失去选择性。为解决这个问题，于是我们提出了新的一种保护方式——电流电压联锁速断保护。

二、工作原理

为了保证选择性，在电压速断保护的基础下增设了一电流继电器作闭锁元件，用以判断是与母线相连的哪条线路发生了故障。这样只有当被保护线路发生故障时，该线路保护的电流、电压继电器均动作时，保护才能作用于跳闸。该保护常以符号 CVC 表示。

三、整定计算

1、用在某一种主要运行方式下(正常运行方式)使电流元件和电压元件保护范围相等的条件整定。这可保证在这种主要运行方式时有最大的保护范围(其它运行方式保护范围都将减少)。

设被保护线路的长度为 L ，正常运行方式下的保护范围为 L_1 。显然，为保证选择性， L_1 应小于 L ，则

$$L_1=L/K_k=0.8L$$

式中： K_k ——可靠系数，取 1.2 ~ 1.3。

保护动作电流为

$$I_{dz}=E_{xt}/(X_{xt}+X_{1l1})$$

式中： E_{xt} ——系统等效电源的相电势；

X_{xt} ——正常运行方式下系统的等值电抗，归算至保护侧；

X_1 ——单位长度线路的正序电抗。

保护动作电压为

$$U_{dz}=\sqrt{3}I_{dz}X_{1l1}$$

2、按灵敏性要求，电流电压联锁速断保护的最小保护范围不应小于被保护线路全长的 15%，这一要求一般量容易达到的。

但对于运行方式变化大的情况，还应用以下公式校验在最不利的运行方式下，电流、电压元件的保护范围。

按最小运行方式下两相短路时校验电流元件，校验公式：

$$\sqrt{3}E_{xt}/2(X_{xt.max}+0.15X_{1l1})\leq U_{dz}$$

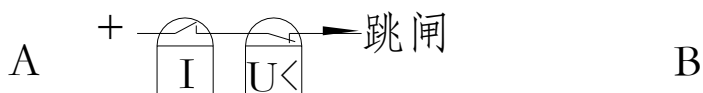
式中： $X_{xt.max}$ ——最小运行方式下系统的等值电抗，归算至保护侧。

按最大运行方式下三相短路时校验电压元件，校验公式：

$$0.15X_{1l1}\times E_{xt}/(X_{xt.min}+0.15x_{1l1})\leq U_{dz}$$

式中： $X_{xt.min}$ ——最大运行方式下系统的等值电抗，归算至保护侧。

3、图 2-16 示意性地表示出了电流、电压联锁速断保护整定保护范围：



四、原理接线图与展开图

详见教材 P54 图 2-16。

- 1、要求能认识图中每一符号。
- 2、要求能掌握整个保护动作过程。

授课课次：10

【教学内容】 阶段式电流保护。

【教学目的】 通过教学，使学生三段式电流保护的保护区及其相互配合关系。

【教学重点】 阶段式电流保护的构成、三段式电流保护的接线图及线路保护

整定计算。

【教学难点】展开图、安装图的识读；线路保护整定计算。

【教学过程】

复习回顾及提问

1. 为什么要装设电压保护？电压速断保护的优缺点分析？
2. 电流电压联锁速断保护的工作原理及整定计算原则？

子项目四 三段式电流保护

一、阶段式电流保护的构成

瞬时电流速断保护只能作为线路首端一部分的主保护，限时电流速断保护可作为瞬时电流速断的近后备，且可作为线路末端的主保护，过电流保护能作为本线路全长的近后备，同时又可作为相邻下一线路的远后备。然而动作时限较长。因此，为了迅速、可靠地切除被保护线路的故障，可将上述三种电流保护组合在一起构成一整套保护，称为阶段式电流保护，一般是构成三段式电流保护，通常将瞬时电流速断保护称为Ⅰ段，限时电流速断保护称为Ⅱ段，过电流保护称Ⅲ段。Ⅰ、Ⅱ段共同构成主保护，第Ⅲ段作为后备保护。特别地指出：阶段式电流保护不一定都用三段，也可以只用Ⅰ、Ⅱ段。

教材 P₄₂ 图 2-17 示意出三段式电流保护各段动作电流，保护范围及动作时限的配合情况。

二、三段式电流保护的接线图

继电保护的接线图一般有框图、原理图、安装图三种。对于采用机电型继电器构成的继电保护来说，用得最多的是原理图和安装图。原理图又分为归总式和分开原理图。

(一) 归总式原理图

该图的目的是为了表示出保护的全部组成元件和它们之间的联系及其动作原理。原理图下所有组成元件都以完整的图形符号表示，便于阅读，适

于初学者阅读。

(二) 展开图

1、特点：将保护的交流电流电压回路、直流回路、信号回路分开绘制。各继电器的线圈和触点分开，分别画在它们各自所属的回路中。同一元件在同一图上为同一符号。

2、阅读方法：坚持“同一图上同一元件同一符号”原则，一般按先交流后直流，由上而下，从左到右的顺序阅读。

应用学校模拟电站图纸进行教学。

(三) 安装图

1、用途：供安装配线，调整实验用的。

2、分类：屏面布置图和屏后接线图。安装图就是屏后接线图。

3、绘制原则和方法：

(1) 按从屏后看设备的实际位置、形状绘制。

(2) 在安装图中，每个设备都要编号。

(3) 屏内设备之间的连接采用“相对标号法”标注。

§2 线路保护整定计算举例

【例 1】

详见教材 P₄₆

补充：当保护 1 的 I 段灵敏度不符合要求时，改用电流电压联锁速断保护，其整定过程：(假设正常运行方式下 $X_{xt}=75\Omega$)

保护范围

$$L_1=L/K_K=80/1.25=64(\text{Km})$$

保护动作电流

$$I_{dz}=E_{xt}/(X_{xt}+X_1L_1)=115/\sqrt{3}(75+0.4\times 64)=0.66(\text{KA})$$

保护动作电压

$$U_{dz} = \sqrt{3} I_{dz} X_{1L_1} = \sqrt{3} \times 0.66 \times 0.4 \times 64 = 29.3(\text{KV})$$

校验：电流元件

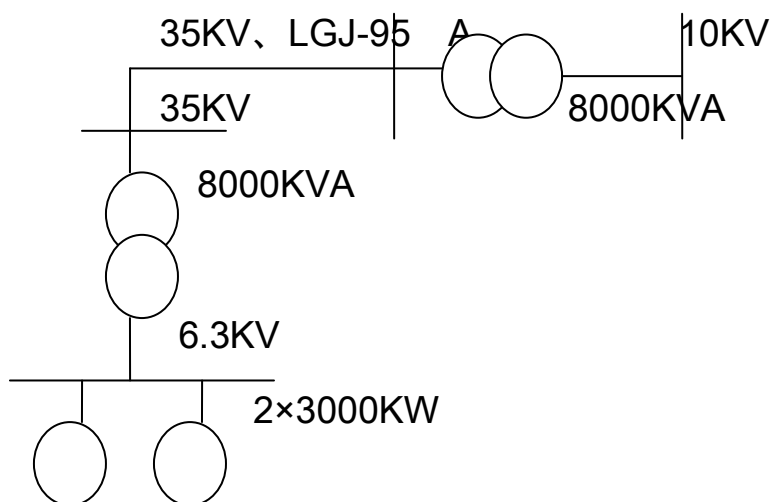
$$\begin{aligned} & \sqrt{3} E_{xt}/2 (X_{xt. \max} + 0.15 X_{1L}) \\ & = \sqrt{3} \times 111/2 \sqrt{3} (82 + 0.15 \times 0.4 \times 80) \\ & = 0.66(\text{KA}) = I_{dz} \text{ 满足要求。} \end{aligned}$$

电压元件

$$\begin{aligned} & 0.15 X_{1L} / E_{xt} / (X_{xt. \min} + 0.15 X_{1L}) \\ & = 0.15 \times 0.4 \times 80 \times 115 / \sqrt{3} (62 + 0.15 \times 0.4 \times 80) \\ & = 4.77(\text{KV}) < U_{dz} \text{ 满足要求。} \end{aligned}$$

【例 2】

某水电站装有 2 台 3000KW 水轮发电机组，通过 1 台 8000KVA 的升压变压器和 30KW 长的 35KV 输电线路将电能送往系统中 A 变电所。水电站的电气主接线图见图 11-1。试整定 35KV 线路出口处电流电压联锁速断保护。



解：(一) 参数及计算

$$\text{取 } S_j = 7.5\text{MVA} \quad U_j = 37\text{KV}$$

1、发电机： $P_e = 3000\text{KW}$, $U_e = 6.3\text{KV}$, $X''_d = 0.8$, $I_e = 343.7\text{A}$, $\text{COS}\Phi_e = 0.8$

$$X_F=0.18 \times 7500 \times 0.8 / 3000 = 0.36$$

2. 水电站主变：Se=8000kVA, Ud=7.52%, Y,d11, 38.5+5%/6.3kv

$$X_{b1} = 0.752 \times 7500 / 8000 = 0.0705$$

3.35kv 线路：S=95mm², l=30km, r₀=0.33Ω/km,

$$x_0 = 0.385 \Omega / \text{km}, z_0 = 0.507 / \text{km}$$

$$X_{X1} = 0.385 \times 30 \times 7.5 / 37^2 = 0.0633$$

(二) 电流电压联锁速断保护整定

1. 作值初步计算

保护范围电抗值为

$$X_{bh} = X_{X1} / K_k = 0.0633 / 1.25 = 0.0506$$

保护动作电流

$$I_{dz} = E_{xt} / (X_{xt} + X_{hh}) \\ = 3700 \times 7.5 / \{ \sqrt{3} (0.36 + 0.0705 + 0.0506) \times 37^2 \} = 243(\text{A})$$

保护动作电压

$$U_{dz} = \sqrt{3} I_{dz} Z_{X1} / K_k = \sqrt{3} \times 243 \times 0.507 \times 30 / 1.25 = 5126(\text{V})$$

2、灵敏度校验

电流元件按最小运行方式下（开一台机）时保护范围应大于线路全长的15%来校验，即：

$$\sqrt{3} / 2 \times E_{xt} / \{ (X_F + X_{b1} + X_{X1} \times 0.15) \times 37^2 / 7.5 \} \\ = 0.87 \times 37000 / \sqrt{3} \{ (0.36 + 0.0705 + 0.0633 \times 0.15) \times 37^2 / 7.5 \} \\ = 231(\text{A}) < I_{dz}, \text{不满足要求。}$$

此外，经计算二台机运行时，不论何种短路方式全线短路电流都大于 243A。

于是，将电流元件整定值降低至 231A。

重新整定保护动作电压

$$U_{dz} = \sqrt{3} I_{dz} Z_{X1} / K_k = \sqrt{3} \times 231 \times 0.507 \times 30 / 1.25 = 4868 (V)$$

电压元件按最大运行方式(开2台机)时保护范围应大于线路全长的15%来校验。

$$\begin{aligned} & 0.15 Z_{xt} \times (X_{xt.min} + 0.15 X_{x1}) \\ &= 0.15 \times 0.507 \times 30 \times 37000 / \sqrt{3} \{ (0.36/2 + 0.0705 + 0.0633 \times 0.15) \times 37^2 / 7.5 \} \\ &= 1027 (V) < U_{dz}, \text{满足要求。} \end{aligned}$$

§3 课堂练习

教材 P₁₀₉ 2-15

§4 作业

教材 P₁₁₁ 2-19

授课课次：11

【教学内容】 项目三 相间短路的方向电流保护

子项目一方向电流保护的工作原理

电流保护方向性问题的提出；功率方向继电器。

【教学目的】 通过教学，使学生掌握装设方向性元件的必要性及功率方向继电器的基本工作原理。

【教学重点】 电流保护方向性问题的提出；方向功率继电器基本原理；整流型功率方向继电器工作原理、动作区、灵敏角、“死区”的消除及“潜动”问题。

【教学难点】 整流型功率方向继电器工作原理，动作区和灵敏角。

【教学过程】

§0 复习回顾及提问

1. 阶段式电流保护的构成？
2. 三段式电流保护配合问题？

项目三 相间短路的方向电流保护

子项目一 方向电流保护的工作原理

§1 电流保护方向性问题的提出

一、为什么在电流保护中装设方向性元件！（必要性）

上一章所分析的电网电流保护是靠动作电流定值和动作时限的整定取得选择性的。在单侧电源电网中，理想的情况下，电流保护能满足线路保护的需。目前在 6~35KV 单侧供电的辐射形电网中，电流保护仍是一种常用的相间短路保护。但是在两侧电源的电网，包括单侧电源环形电网中，只靠电流定值和动作时限的整定不能完全取得动作的选择性。

如教材 P57 图 3-2 所示的环形电网，就给电流阶段式保护带来了新的问题：

1、对于 I 段保护，这时为了使保护在区外故障时不误动，其整定值不仅要躲过本线路末端短路时流经保护的最大短路电流，而且要躲过保护反方向故障时流经本保护的最大短路电流。

2、对于 II 段保护，这时不仅要下相邻下一线的第 I 段配合，而且还要与其在同一母线下的各条出线的第 I 段相配合。

3、对于 III 段保护，这时仅靠时限的配合已无法获得选择性。

上述问题的产生，皆因双侧电源电网和环形电网中，在保护安装处反方向短路时，有可能使保护动作的缘故。

于是，为了解决上述问题，我们提出在原有的电流保护基础上，加装一个能判断故障方向的元件即功率方向继电器。

二、电流方向保护的基本工作原理

以教材 P58 页图 3-3 方向过电流保护原理接线图来说明。

在双侧电源电网的电流保护加上方向元件后的实质就是把电网看成两个单侧电源辐射形电网的迭加。举例说明：

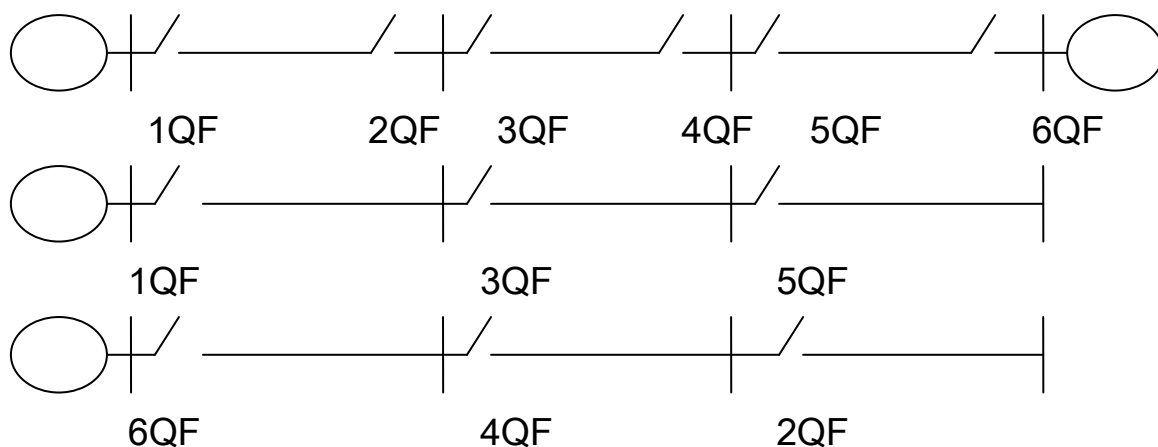
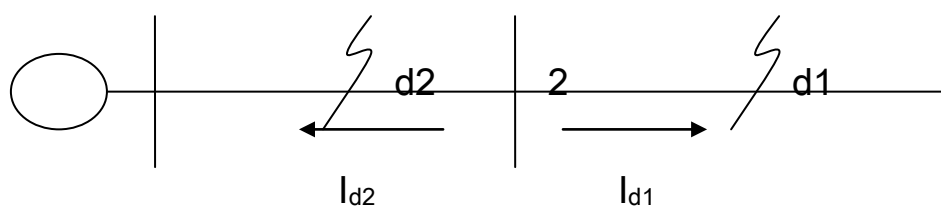


图 3—1

方向元件 (功率方向继电器) 之所以能判别正、反向故障是因为正、反向故障时，保护安装处的母线残压与被保护线路上的电流之间的相位关系不同。方向元件正是根据这种不同来识别正、反向故障的。如图 11-2 (a) 所示的保护 2 来说，正方向 d_1 短路时，短路电流 I_{d1} 落后于母线残压 U_{cy} 的角度 ϕ_d 为 $0 \sim 90^\circ$ ；反方向 d_2 点短路时， I_{d2} 落后于 U_{cy} 的角度 ϕ_d 为 $180^\circ \sim 270^\circ$ ，见图 11-2 (b)。



I_{d1}

图 3-2

§2 功率方向继电器

一、概述

功率方向继电器的任务是测量送入继电器的电压 U_j 和电流 I_j 之间的相位，以判别正、反向故障。

目前使用的功率方向继电器为感应型、整流型和晶体型。整流型继电器灵敏性好，无电压死区、调试方便及动作速度快等。

二、整流型功率方向继电器工作原理

整流型功率方向继电器的原理接线详见教材 P59 图 3-6 所示。该电路由电压形成回路、整流滤波回路、比较回路及执行元件——极化继电器组成。其中图 3-6 (a) LG—11 型用于相间短路的方向元件。LG—12 型 (图 3-6 (a)) 用于接地保护中方向元件。

当给 LG—11 型继电器加入电压 U_j 和电流 I_j 经 DKB 作用变换成 U_d ，有 $U_d=K_I I_j$

式中 K_I —电抗变压器的转移阻抗。

U_d 超前 I_j 的相位角 Φ_z (K_I 的阻抗角) 可利用电阻 R_ϕ 来调节。 Φ_z 的余角 α ($\alpha=90^\circ-\Phi_z$) 叫作继电器的内角，LG—11 的内角有两个值： 30° 和 45° 。

电压 U_j 加到 YB 的一次侧。YB 一次线圈的等效电感 L 、等效电阻 R ，与串联的电容 C_1 构成对 50Hz 串联谐振回路。此时，有 $U_L=-U_C$ ， U_L 超前 $U_j 90^\circ$ ，

即加在 YB 一次线圈电压 U_{YB1} 超前 $U_j 90^\circ$, YB 二次侧线圈上电压

$$U_{YB2} = K U_{YB1}$$

(K 为 YB 变比), 所以 U_{YB2} 也超前 $U_j 90^\circ$, 即

$$U_{YB2} = K_U U_j$$

式中 K_U — 变换系数(复数)。

根据图 4-6(a)所示的方向加到整流桥 BZ1、 BZ2 交流侧的电压分别为

$$E_1 = K_I I_j + K_U U_j$$

$$E_2 = K_I I_j - K_U U_j$$

对于执行元件 JJ 来说, E_1 为动作量, E_2 为制动量, 继电器动作条件为:

$$E_1 = K_I I_j + K_U U_j \geq E_2 = K_I I_j - K_U U_j$$

三、LG-11 型功率方向继电器的动作区和灵敏角

以图 4-7 所示相量图来分析继电器的动作区和灵敏角:

当 $\Phi_j = -\alpha$ 时, 继电器工作是最灵敏的, 所以称 $\Phi_j = -\alpha$ 为灵敏角, 以 Φ_{lm} 表示。

与 $\Phi_j = -\alpha$ 的 I_j 重合线称为灵敏线。

灵敏线的垂直线称为动作区与非动作区的边界线。

继电器动作的 Φ_j 范围:

$$-(90^\circ + \alpha) \leq \Phi_j \leq 90^\circ - \alpha$$

LG-11 型继电器电流、电压线圈的同极性端子为 5、7 端子。

四、LG-11 型功率方向继电器电压“死区”的消除

(一) 什么是功率方向继电器电压“死区”?

在保护安装处附近发生金属性三相短路时, 母线残压 U_{cy} 接近于零, 即 $U_j = 0$, 此时, 继电器将不能可靠动作。使功率方向继电器不能可靠动作靠近保护安装处的这段范围, 称为功率方向继电器电压“死区”。

(二) 消除“死区”的方法

在 LG-11 型继电器电压回路中串入了电容 C ,以便和 YB 一次线圈的等效电感、电阻一起构成对 50Hz 频率的串联谐振回路。

五、功率方向继电器的“潜动”的问题

(一) 何谓方向继电器的“潜动”

理论上讲 ,对功率方向继电器来说 ,当 U_j 、 I_j 中只有一个量加入继电器时 ,继电器不应动作 ;实际中 ,由于比较回路中各元件参数不完全对称 ,继电器可能动作 ,这称为潜动。

(二) “潜动”的分类

- 1、电压潜动和电流潜动
- 2、正向潜动和反向潜动

(三) “潜动”的危害

保护安装处反向出口短路时 ,继电器可能误动 ;

保护安装处正向出口短路时 ,继电器可能拒动或灵敏系数降低。

(四) “潜动”的消除

消除电流潜动 ,调整电阻 R2 ;消除电压潜动 ,调整电阻 R1。

§3、作业

补充习题 :

双侧电源电网和单侧电源环网中为什么要装设功率方向元件 ?

授课课次 : 12、13

【教学内容】 功率方向继电器的接线方式及方向过电流保护。

【教学目的】 通过教学 ,使学生掌握 90° 接线方式下功率方向继电器的接

线及方向过电流保护整定的特殊问题。

【教学重点】功率方向继电器的接线方式及在该接线方式下功率方向继电器在各种相间短路的动作行为，方向过电流保护整定的特殊问题。

【教学难点】在 90° 接线方式下功率方向继电器在各种相间短路时的动作行为。

【教学过程】

§0 复习回顾及提问

1. 为什么要加装方向元件？加装方向元件后的实质？
2. 功率方向继电器的作用？
3. 功率方向继电器的工作原理？
4. 有关功率方向继电器的几个概念：电压死区、潜动。

§1 概述

一、概念

所谓功率方向继电器的接线方式就是指它与 PT 和 CT 之间的连接方式，也就是给 GJ 的电压线圈和电流线圈分别加入什么电压和什么电流的问题。

二、对功率方向继电器接线方式的基本要求

- 1、在发生各种类型故障时，均能正确判断短路功率的方向；
- 2、为了有较高的灵敏系数，故障后加入继电器的电压 U_j 尺量大些，并尽量使 Φ_j 接近 Φ_{lm} 。

§2 功率方向继电器的接线方式

一、功率方向继电器的接线方式

为了满足上述对接线方式的基本要求，相间短路保护所用功率方向继电器通常采用 90° 接线方式。

所谓 90° 接线，就是假定相电流与其相对应的电压相量相同的情况下，接入继电器电流线圈中的电流在相位上领先接于电压线圈中的电压 90° 。即每个

功率继电器电流线圈接入 I_A 、 I_B 、 I_C 时，相应接入电压线圈的电压应为 U_{BC} 、 U_{CA} 、 U_{AB} 。参见表 3-1。

继电器相别	I_j	U_j
A 相继电器 1GJ	I_A	U_{BC}
B 相继电器 2GJ	I_B	U_{CA}
C 相继电器 3GJ	I_C	U_{AB}

特别指出的是：功率方向继电器电流线圈和电压线圈的极性与相应的 CT 和 PT 二次线圈的有误差性连接要正确。否则，若有一个线圈的极性接错，就会出现正方向短路时保护拒动，而反方向短路时，保护误动的严重事故。

二、采用 90° 接线方式的功率方向继电器，在各种相间短路时的动作行为分析。

(一) 正方向三相短路时，保护安装处的电流、电压相量图如图 2-1 所示。(A 相功率方向继电器 1GJ 进行分析)

图(略)

选 U_A 为参考相量。

其中： Φ_d 为 I_A 、 U_A 相位差，即线路阻抗角，

$$\Phi_d \text{ 变化范围：} 0^\circ \leq \Phi_d \leq 90^\circ$$

$$\Phi_j \text{ 变化范围：} -90^\circ \leq \Phi_j \leq 0^\circ$$

已知 LG-11 型功率方向继电器的动作范围：

$$-(90^\circ + \alpha) \leq \Phi_j \leq 90^\circ + \alpha$$

故正方向三相短路时能使继电器的动作的 α 角范围：

$$0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$$

我国生产的 LG-11 型功率方向继电器的内角 α 为 30° 或 45° (即灵敏角 Φ_{lm} -30° 和 -45°)。

为提高继电器的灵敏度，希望继电器在三相短路时，尽量工作在 $\Phi_j =$

$\Phi_{lm}=-\alpha$ 的最灵敏状态下。

(二) 正方向两相短路时

图 2-2 (a) 为正方向 BC 两相短路时电流，电压相量图；(b) 为 C 相功率方向继电器 3GJ 的工作情况。

其中选 EA 为参考相量。

图 (略)

可见，按三相短路选择的 α ，能够保证功率方向继电器在正向两相短路正确动作。

三、对反应相间短路的功率方向继电器采用 90 接线的评价

1、不论发生三相短路或两相短路，继电器均能正确判断故障方向。

2、适当选择 α (或 Φ_{lm})，可以保证在三相短路或两相短路时继电器工作于接近灵敏状态。两相短路时，继电器不能有“死区”，三相短路时继电器可能有“死区”。

§3 非故障相电流的影响及防止的措施

一、非故障相电流功率方向继电器动作行为的影响

非故障相电流可能引起功率方向继电器在反向短路时动作，从而造成误动。下面以两相短路为例进行分析：

如图 2-2 所示为 BC 两相短路时网络示意图，下面来分析一下非故障相



图 3-2

此时，A 相中为正常负荷电流，设此时正常负荷电流 I_A 参考正方向如图所示。选择 EA 为参考相量，可作出 1GJ 中 $U_j(U_{BC})$ 和 (I_{fh}) 间的相量图，

参见图 13-3。可见，线路 L2BC 两相短路时，本来对于保护 1 来说是反方向故障，但由于非故障相电流影响而造成保护误动。

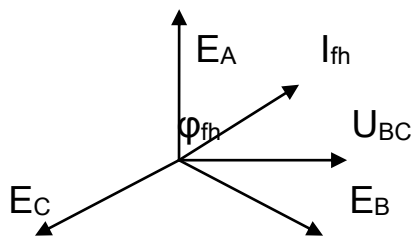


图 3-3

可见：1GJ 的 φ_j 为 $[-90^\circ, 0^\circ]$ ，故保护 1 的功率方向元件会动作。

三、防止误动作的措施

1. 提高电流元件的整定值，使其大于非故障相的负荷电流；
3. 采用按相起动接线方式，参见图 13-4。

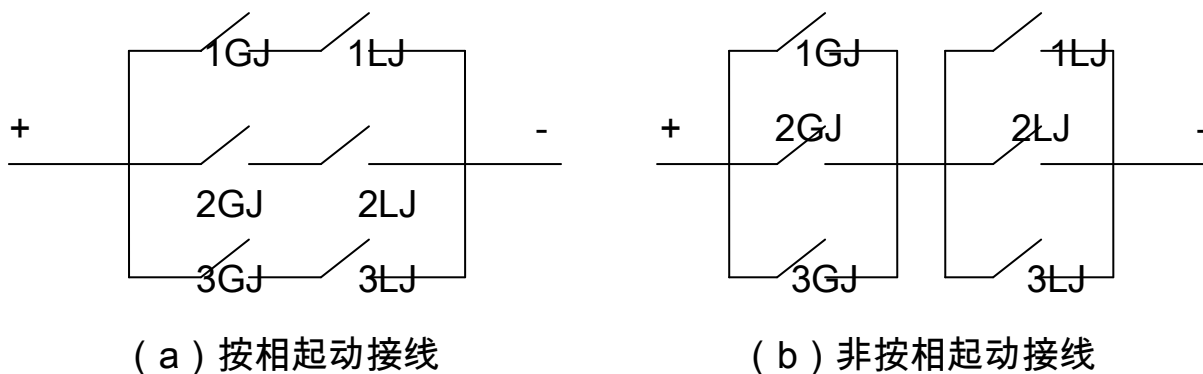


图 3-4

§4 方向过电流保护

前已述及，当双侧电源电网中加装方向元件后，实质上就是可以把双侧电源电网分解成两个单侧电源辐射电网，从而不必考虑反方向短路，故整定计算时与三段式电流保护动作电流整定计算一致。这里仅阐述方向过电流保护动作电流整定计算时的特殊问题。

一、方向过电流保护动作电流整定计算

整定计算公式

$$I_{dz} = K_k K_{zq} I_{fh.max} / K_h$$

但在方向过电流保护中须考虑以下问题：

1、考虑 $I_{fh,max}$ 时，对于单侧电源环形电网，须考虑开环时负荷电流的突然增加；

2、对中性点直接接地电网，若采用了零序电流保护闭锁方向过电流保护的措施，则方向过电流保护的动作电流可不考虑躲过该电网单相接地时的非故障相电流。

3、方向过电流保护要作为相邻线路的远后备，因此同方向过电流保护间要进行灵敏系数配合，如教材 P67 图 3-16 所示单相电源环形电网络，应使

$$I_{dz.2} < I_{dz.4} < I_{dz.6}, \quad I_{dz.5} < I_{dz.3} < I_{dz.1}$$

当按整定计算公式进行整定后不满足这种不等关系，我们亦可以引入一配合系数 K_{ph} 进行修正，即

$$I_{dz.4} = K_{ph} I_{dz.2}, \quad I_{dz.1} = K_{ph} I_{dz.3} \quad \dots$$

式中 K_{ph} ——一般取 1.1。

4、一般不必校验方向元件的灵敏系数，方向过电流保护的灵敏系数由电流元件决定。

二、方向过电流保护区动作时限的整定及方向元件的装设原则

一、整定原则

双侧电源电网过电流保护加上方向性元件后，就可看成两个单侧电源电网的过电流保护，分别进行时限配合，其动作时限分别按阶梯原则整定。参见教材 P67 图 4-17 所示。

于是有： $t_1 > t_3 > t_5$ ， $t_6 > t_4 > t_2$

二、一些特殊问题

1、按阶梯原则整定保护动作时限，不仅要与主于线上同一方向的保护进行配合，而且要与对端变电所母线上所有其它出线上的保护相配合。

2、同一母线两侧主方向过电流保护，如果动作时限不等，则时限较长者

(长出之值不小于一个时限级差 Δt) 方向元件可以省去 ; 若动作时限相等 , 则都需加方向元件。举例说明。

三、 相继动作区

线路两侧断路器同时跳闸切除故障 , 但实际中是断路器先跳闸 , 当短路电流重新分配后 , 另一断路器才跳闸。保护装置的这种动作情况 , 叫做“相继动作区”。

相继动作引起的根本原因 : 短路电流在环网中的分配是与线路的阻抗成反比的。

相继动作产生的危害 : 延长了故障的切除时间 , 但有助于提高后跳保护的灵敏性。

§5 作业

教材 P₁₁₀ 3-6 3-7

授课课次 : 14

【教学内容】 大电流接地系统中接地短路时的零序电压和零序电流及小电流接地系统中单相接地时的零序电压和零序电流。

【教学目的】 通过教学 , 使学生掌握两种系统各自发生接地短路时零序电压 (流) 的特点及其分布规律。

【教学重点】 两种系统各自发生接地短路时零序电压 (流) 的特点及其分布规律。

【教学难点】两种系统各自发生接地短路时零序电压（流）的特点。

【教学过程】

§0 复习回顾及提问

1. 90° 接线方式下各相功率方向继电器应该加的电压和电流分别是什么？
2. 为避免非故障相电流对功率方向继电器动作行为的影响，可以采取的措施有哪些？
3. 方向过电流保护在整定计算时应注意哪些特殊问题？

§1 概述

在大电流接地电网中，如果发生单相接地短路时，前已述及的电流保护（含方向电流保护）采用三相完全星形接线，就能够对这种故障起到保护作用，但由于它们的动作电流较大，而单相接地短路电流又往往比相间短路电流小；同时，作为相间短路保护兼作接地保护时，其动作时限也比专用接地保护长，故在该接地网中装设专用接地保护——零序保护。

在小电流接地电网中，如果发生单相接地短路时，没有真正意义上的零序电流，只有零序电容电流，故允许带接地点继续运行一段时间（1~2小时），因此在该系统中仅装设作用于信号的零序保护。

§2 中性点直接接地电网接地短路时的零序电压和零序电流

一、大电流接地电网接地短路时的特点

1、大电流接地电网正常运行及相间短路时无零序分量

1) 正常运行或三相短路时

因为三相电压和电流是对称的，故

$$U_0 = 1/3 (U_A + U_B + U_C) = 0$$

$$I_0 = 1/3 (I_A + I_B + I_C) = 0$$

即没有零序电压和零序电流。

2) 两相短路时

假若 $d_{BC}^{(2)}$ 两相短路，在故障 $U_{dB}=U_{dC}=-1/2U_{dA}; I_{dA}=0, I_{dB}=-I_{dC}$ ，在故障点的零序

电压和零序电流为

$$\begin{aligned} U_{d0} &= 1/3(U_A + U_B + U_C) \\ &= 1/3[U_{dA} + (-1/2U_{dA}) + (-1/2U_{dA})] = 0 \\ I_{d0} &= 1/3(I_{dA} + I_{dB} + I_{dC}) \\ &= 1/3(0 + I_{dB} - I_{dB}) = 0 \end{aligned}$$

即没有零序电压和零序电流。

2、接地短路时

1) 单相接地时

假若 A 相接地短路，则在接地故障点 $U_{dA}=0, U_{dB}=U_B, U_{dC}=U_C, I_{dA}=I_A, I_B=0, I_C=0$ ，则在故障点零序电压、零序电流为

$$\begin{aligned} U_{d0}^{(1)} &= 1/3(U_{dB} + U_{dC}) = 1/3(U_B + U_C) \\ I_{d0}^{(1)} &= 1/3I_{dA} \end{aligned}$$

即存在零序电压和零序电流。

2) 两相接地短路时

设 BC 两相接地短路时，则在故障点有 $U_{dB}=U_{dC}=0, U_{dA}=U_A; I_{dA}=0, I_{dB}=I_{dC}$ ，则在故障点零序电压、零序电流为

$$\begin{aligned} U_{d0}^{(1 \cdot 1)} &= 1/3U_{dA} = 1/3U_A \\ I_{d0}^{(1 \cdot 1)} &= 1/3(I_{dB} + I_{dC}) \end{aligned}$$

即存在零序电压和零序电流。

3、结论

出现零序电压和零序电流是大电流接地电网中接地故障区别于正常运行和相间短路的基本特征。

二、大电流接地电网接地短路时零序电压、零序电流分布规律

1、故障点处零序电压最高，离故障点越远零序电压越低，变压器接地中性点处零序电压为零。举例说明。

2、保护安装处的零序电压与零序电流的大小关系决定于该处背后的零序阻抗值，相位关系则决定于母线背后零序阻抗的阻抗角 Φ_{d0} 。通常 Φ_{d0} 约为 $70^\circ \sim 85^\circ$ 。

3、接地故障点零序电流的大小取决于输电线路的零序阻抗和中性点接地变压器的数目，接地数目越多，零序电流越大。

§3 中性点不接地电网接地短路时的零序电压和零序电流

一、中性点不接地电网单相接地时的零序电压特点

$$U_N = -E_A$$

$$U_A = 0$$

$$U_B = E_B - E_A = \sqrt{3}E_A e^{-j150^\circ}$$

$$U_C = E_C - E_A = \sqrt{3}E_A e^{j150^\circ}$$

于是，电网出现了零序电压，且电网各处零序电压相等，即

$$U_0 = 1/3 (U_A + U_B + U_C) = -E_A = U_N$$

二、中性点不接地电网单相接地时的零序电流特点

假设 A 相单相接地时， $U_A = 0$ ，所以各元件（发电机及各条线路 A 相对地

电容电流为零，而非故障相 B、C 相对地电容电流不为零，故出现零序电流电流，即

$$3I_{0.c} = I_{B(C)} + I_{C(C)} = j\sqrt{3}\sqrt{3}\omega C_0 U_0 = -E_A = U_N$$

非故障元件保护安装处的零序电容电流为本身非故障相对地电容电流之和。即

$$3I_{0.fg.1} = 3j\omega C_{0.1} U_0$$

$$3I_{0.fg.2}=3j\omega C_{0.2}U_0$$

$$3I_{0.fg.f}=j3\omega C_{0.F}U_0$$

非故障元件零序电容电流的方向皆由母线流向线路。

流过接地点处零序电容电流为整个电网各元件非故障相对地电容电流之和，即

$$I_{jd}=3I_{0.1}+3I_{0.2}+3I_{0.3}+3I_{0.F}=j\omega(C_{0.1}+C_{0.2}+C_{0.3}+C_{0.F})U_0=j\omega C_{0.\Sigma}U_0$$

故障元件保护安装处的零序电容电流为

$$3I_{0.g}=3I_{0.3}-I_{jd}=-(3I_{0.1}+3I_{0.2})=-j\omega(C_{0.\Sigma}-C_{0.3})U_0$$

故障元件的零序电容电流方向由线路流向母线。

三、结论

1、接地相对地电压降为零，其它两相对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍，出现零序电压 U_0 ，其值等于故障前电网的相电压，且系统各处零序电压相等。

2、故障元件保护安装处通过的零序电流为所有非故障线路非故障相对地零序电容电流之和，其方向从线路流向母线。

3、非故障元件保护安装处通过的零序电流为本元件非故障相对地零序电容电流之和，其方向是从母线流向线路。

授课课次：15

【教学内容】 中性点直接接地电网的零序电流保护。

【教学目的】 通过教学，使学生掌握中性点接地电网中零序电流保护的构成及其整定计算方法。

【教学重点】 三段式零电流保护整定原则。

【教学难点】三段式零序电流保护与三段式相间短路电流保护相对照整定时的特殊问题。

【教学过程】

§0 复习回顾及提问

1. 中性点直接接地电网中发生接地短路时零序电压和零序电流的特点？
2. 中性点不直接接地电网中发生接地短路时零序电压和零序电流的特点？

§1 概述

中性点直接接地电网中的零序电流保护和反应相间短路的电流保护一样采用阶段式，为三段式或四段式。三段式零序电流保护由零序电流速断（零序 I 段），限时零序电流速断（零序 II 段），零序过电流保护（零序 III 段）组成。三段式零序电流保护接线图详见教材（讲授时简单分析之）。零序 I、II 段共同构成反应本线路接地故障的主保护，零序 III 段为后备保护。零序四段保护的构成是在三段的基础上增加了一个不灵敏的零序 II 段。

§2 零序电流速断保护（零序 I 段）

零序 I 段的作用、地位、特点等大致与反应相间短路的电流速断保护一致。

零序 I 段动作电流的整定计算需考虑以下三个原则：

一、为保护选择性，零序 I 段的动作电流的整定应躲过被保护线路末端发生单相或两相接地短路时可能出现的最大零序电流 $3I_{0.max}$ 。即

$$I_{dz} = K_k 3I_{0.max}$$

式中 K_k 可靠系数，取 1.2 ~ 1.3

值得指出的是：

1、在确定 $3I_{0.max}$ 时，需考虑运行方式和接地故障类型。

1) 运行方式：正序阻抗 z_1 为最小，保护安装处变压器中性点接地数目最多，而线路末端变压器中性点接地数目最少或都不接地的情况。

2) 接地故障类型： $X_{1\Sigma} > X_{0\Sigma}$ ，则 $3I_{0.(1.1)} > 3I_{0.(1)}$ ；反之，若 $X_{1\Sigma} < X_{0\Sigma}$ ，则 $3I_{0.(1.1)} < 3I_{0.(1)}$

$<3I_0^{(1)}$ 。

2、零序 I 段同样不能保护线路的全长，但保护范围较相间短路电流保护 I 段大，且受运行方式变化影响小。

二、I 段动作电流应躲过由于断路器三相触头不同时合闸所出现的最大零序电流 $3I_{0.bt}$, 即

$$I_{dz} = K_k 3I_{0.bt}$$

如果在零序 I 段的接线中已装设有一个小延时的中间继电器，则本条件可以不考虑。

按上述两项原则整定的零序 I 段，称为灵敏的零序 I 段，其灵敏度按保护范围的长度来校验，要求最小保护范围不小于线路全长的 15%。

三、在 220KV 及以上电压等级的电网中，常采用综合自动重合闸装置，此时，将由综合重合闸闭锁灵敏零序 I 段，而增设按躲过非全相振荡时出现最大零序电流整定的不灵敏零序 I 段。

§3 限时零序电流速断保护（零序 II 段）

一、零序 II 段问题的提出及整定都类似于反应相间短路中的电流 II 段保护。

二、值得指出的几个问题

1、如教材 P74 图 5-4 所示网络，这种情况下，有

$$I_{dz.1}^{II} = K_k 3I_{0.js}$$

式中 K_k 取 1.1 ~ 1.2.

当变压器 B2 切除或改为中性点不接地运行时，此时有

$$I_{dz.1}^{II} = K_k I_{dz.2}^I$$

2、在装设综合自动重合闸电网中，亦应闭锁零序 II 段。

3、零序 II 段动作时限应此下一线路零序 I 段的动作时限长一个时限级差，通常取为 0.5S。

4、零序 II 段的灵敏性校验按被保护线路末端发生接地短路时的最小零序电流校验，要求 $K_{lm} \geq 1.3 \sim 1.5$ 。

5、解决零序 II 段灵敏系数不满足要求的两种基本方法。

§4 零序过电流保护（零序 III 段）

一、动作值整定

动作电流应躲过下一线路出口处相间故障时流过本保护的最大不平衡电流 $I_{bp.max}$ 整定，即

$$I_{dz.j}^{III} = K_k I_{bp.max}$$

实际整定时，根据运行经验，一般取 $I_{dz.j}^{III}$ 为 $2 \sim 4A$ 。

二、灵敏度校验

灵敏系数应按保护范围末端接地短路时流过本线路的最小零序电流校验。作近后备时，要求 $K_{lm} \geq 1.3 \sim 1.5$ ；作远后备时，要求 $K_{lm} \geq 1.2$ 。

三、动作时限整定

动作时限按阶梯性原则整定。

值得指出的是：安装在受电端变压器 B 上的零序过电流保护可以是瞬时动作的。

§5.作业

教材 P₁₁₁ 3-11

授课课次：16

【教学内容】距离保护的基本原理、阻抗继电器的构成原理（一）。

【教学目的】通过教学，使学生掌握距离保护的基本原理及构成，并初步掌握阻抗继电器测量阻抗的基本原理。

【教学重点】距离保护的作用，基本工作原理，主要组成元件；阻抗测量的基本方法及阻抗继电器的动作特性；全阻抗继电器。

【教学难点】阻抗继电器的动作特性及全阻抗继电器的特性及实现方法。

【教学过程】

§0 引入

前述电流电压保护，其保护范围都随系统运行方式的变化而变化，在某些运行方式 I，II 段电流保护的保护区都变得很小；甚至没有保护区，不能满足电力系统稳定对快速切除故障的要求。III 段电流保护虽是灵敏性高的一种保护，但对于长距离、重负荷线路，由于线路负荷电流可能与线路末端短路电流相差甚微，这种情况，III 段保护作用也不大。因此我们必须寻求一种新的保护方式——距离保护。

§1 距离保护的基本原理

一、距离保护的作用

距离保护是为满足日益扩大、电压水平越来越高、结构越来越复杂的电力系统的要求，为提高保护灵敏性，并使其保护区不受或少受系统运行方式的影响的要求而设置的。该保护是性能完善的保护装置。

二、距离保护的基本原理

(一) 距离保护的基本概念

所谓距离保护就是反应故障点至保护安装处之间的距离，并根据该距离的大小确定动作时限的一种继电保护装置。当故障点距离保护安装处越近时，保护装置感觉的距离越小，保护的时限就越短；反之，当故障点距保护安装处越远时，保护装置感觉的距离越远，保护的时限就越长。

(二) 距离保护的实质

距离保护测量故障点至保护安装处的距离，其实质就是测量故障点至保护

安装处的线路阻抗。

故障时，故障点至保护安装处的线路阻抗

$$Z_d = \dot{U}_i / \dot{I}_i$$

式中： \dot{U}_i —保护安装处母线电压。

\dot{I}_i —母线流向线路的电流。

假设保护用 PT，CT 变化 $n_y = n_i = 1$ ，则测量元件感受阻抗

$$Z_j = \dot{U}_j / \dot{I}_j = \dot{U}_i / \dot{I}_i = Z_d$$

这样，测量元件将测得的感受电抗 Z_j 与整定阻抗 Z_{zd} (Z_{zd} 对应于预先整定的保护范围) 进行比较，当 $Z_j < Z_{zd}$ 时，保护动作；当 $Z_j > Z_{zd}$ 时，保护不动作。因此，距离保护又称为阻抗保护。

(三) 距离保护的时限特性

所谓距离保护的时限特性是指动作时限 t 与故障点至保护安装处之间 l 的关系。目前广泛应用的是三段式阶梯形时限特性，距离 I 段 $t^I \approx 0s$ ，距离 II 段 $t^{II}_1 = t^I_2 + \Delta t$ ；距离 III 段 $t^{III}_1 = t^{II}_2 + \Delta t$ 。

三、距离保护的主要组成元件

三段式距离保护的原理接线图详见教材。

(一) 距离保护的主要组成元件

- 1、起动元件：作用是当故障发生时，立即起动整套保护，并可兼作距离 III 段的测量元件。通常采用电流继电器或阻抗继电器。
- 2、方向元件：作用是判别故障时短路功率的方向，防止在保护安装处反方向故障时保护误动作。通常采用功率方向继电器或采用具有方向性的阻抗继电器。
- 3、测量元件：作用是测量故障点至保护安装处的阻抗，并与整定值比较，以确定保护动作与否。通常采用阻抗继电器。
- 4、时间元件：作用是建立距离 II、III 段的动作时限，通常采用时间继电器。

(二) 距离保护动作过程分析

讲授距离 I 段动作过程，由学生自己分析距离 II、III 段。

§ 2 阻抗继电器构成原理

一、阻抗测量的基本方法用阻抗继电器的动作特性

阻抗继电器是距离保护的测量元件，如教材 P₈₇ 图 6-2 (a) 所示，网络图中，当线路 L₂ 上任一点故障时，阻抗继电器感受到阻抗 Z_j 可表示为：

$$Z_j = \dot{U}_j / \dot{I}_j = Z_d n_1 / n_2$$

可见， Z_j 与 Z_d 成正比，比例常数为 n_1/n_2 。

在复数平面上，测量阻抗 Z_j 可写成 $R+jX$ 的复数形式。

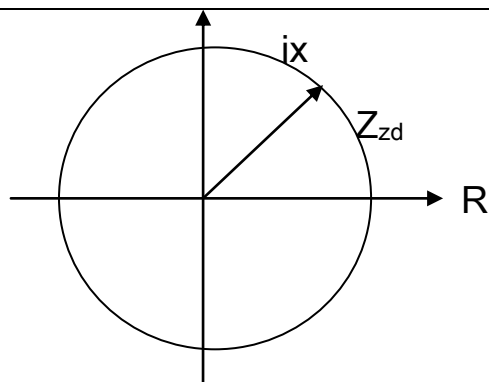
为了便于比较测量阻抗 Z_j 与整定阻抗 Z_{zd} ，通常将它们画在同一阻抗复数平面上。以图 6-2 (a) 中线路 L₂ 的保护 2 为例，在图 6-2 (b) 上，保护正方向故障时的测量阻抗在第一象限直线 BC 上， ϕ_d 为线路阻抗角，保护反方向故障时的测量阻抗在第三象限直线 BA 上。距离 I 段 $Z_{zd}^I = 0.85Z_{BC}$ ， $\phi_d = \phi_z$ ， Z_{zd}^I 落在直线 BC 上，它所表示的这一直线即为继电器的动作区，直线以外的区域即为非动作区。实际上，阻抗继电器的保护范围不能是一条直线，因为考虑到故障点过渡过程电阻的影响用互感器角度误差的影响时，不会落在整定阻抗的直线上。为了在保护范围内故障时动作，必须扩大动作区，将动作区扩展为各种圆。

应该指出：阻抗继电器的动作特性并不一定非扩大成圆形不可，只是由于圆特性阻抗继电器的接线实现起来简单且便于制造和调试。

二、全阻抗继电器的特性方程及实现方法

(一) 全阻抗继电器的特性

全阻抗继电器的特性圆是以坐标原点为圆心，以整定阻抗的绝对值 $|Z_{zd}|$ 为半径作的一个圆。如教材所示。圆内为动作区，圆外为非动作区。



全阻抗继电器动作阻抗 Z_{zd} 是与测量阻抗角 Φ_j 无关的。

(二) 全阻抗继电器实现方法

1、绝对值比较方式

分析教材 P₈₈ 图 6-4, Z_j 落入圆内的条件是 :

$$|Z_j| \leq |Z_{zd}|$$

等式两边同乘以电流 \dot{I}_j , 得

$$|\dot{I}_j Z_j| \leq |\dot{I}_j Z_{zd}|$$

$$\text{即: } |\dot{U}_j| \leq |\dot{I}_j Z_{zd}|$$

$$\text{亦即: } |\dot{U}_j| \leq |\dot{I}_j K_I / K_U|$$

被比较绝对值的两个电压可由教材 P₈₈ 图 6-5 获得。

2、相位比较方式

由绝对值比较方式分析过程可以看出继电器动作条件又可用阻抗向量 $Z_{zd}+Z_j$ 与 $Z_{zd}-Z_j$ 之间的夹角表示为:

$$-90^\circ \leq \Phi \leq 90^\circ$$

将阻抗向量 $Z_{zd}+Z_j$ 与 $Z_{zd}-Z_j$ 同乘以电流 \dot{I}_j , 便可得到两比较相位电压 :

$$\dot{U}_I = \dot{I}_j Z_{zd} + \dot{U}_j$$

$$\dot{U}_{II} = \dot{I}_j Z_{zd} - \dot{U}_j$$

亦即有 :

$$\dot{U}_I = \dot{I}_j K_I / K_U + \dot{U}_j$$

$$\dot{U}_{II} = \dot{I}_j K_I / K_U - \dot{U}_j$$

被比较相位的两个电压，可由教材 P₉₁ 图 6-8 获得。

§3 作业

补充习题

1、什么是距离保护？距离保护的实质是什么？距离保护一般由哪几部分组成？

2、在常规保护中，为什么要将阻抗继电器动作特性制造成圆形？全阻抗继电器的动作特点是什么？

授课课次：17

【教学内容】 方向阻抗继电器，偏移特性阻抗继电器的特性方程及实现方法；插入电压的形成及其作用；阻抗继电器的精确工作电流。

【教学目的】 通过教学，使学生掌握方向阻抗继电器、偏移特性阻抗继电器的特点及解决方向阻抗继电器电压死区的方法。

【教学重点】 方向阻抗继电器，偏移特性阻抗继电器的特性方程及实现方法；插入电压的形成及其作用。

【教学难点】 插入电压的形成及其作用。

【教学过程】

§0 复习回顾及提问

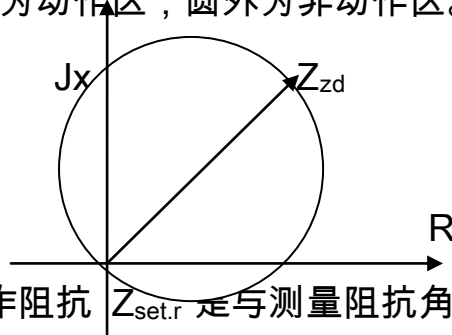
1. 为什么要考虑装设距离保护？
2. 距离保护的工作原理？
3. 距离保护的组成及保护动作过程分析？
4. 阻抗测量的基本方法是什么？
5. 全阻抗继电器的特点？

§1 方向阻抗继电器的特性及实现方法

一、方向阻抗继电器特性

全阻抗继电器无方向性，不能判别短路故障的方向，若须判别短路故障的方向时，须另加方向元件即功率方向继电器。于是我们提出了一种既能测量短路点远近，又能判别短路方向的继电器----方向阻抗继电器。

方向阻抗继电器的特性圆是一个以整定阻抗 Z_{zd} 为直径，圆周过坐标原点的圆。如图 17-1 所示。圆内为动作区，圆外为非动作区。



方向阻抗继电器的动作阻抗 $Z_{set.r}$ 是与测量阻抗角 Φ_r 有关的； $\Phi_r = \Phi_{set}$ 时， $Z_{op.r}$ 最大，等于 Z_{set} ，此时，保护范围最大，动作最灵敏， $\Phi_{sen} = \Phi_r = \Phi_k$ ，称为方向阻抗继电器的灵敏角； $\Phi_r = \Phi_k$ 时，若 $\Phi_r \neq \Phi_{set}$ ，则继电器动作条件为 $|Z_r| \leq |Z_{op.r}|$ 。

二、方向阻抗继电器实现方法

(一) 幅值比较方式

分析教材 P₁₂₀ 图 4-9, Z_r 落入圆内的条件是

$$|(-1/2) Z_{set} + Z_r| \leq |(1/2) Z_{set}|$$

等式两边乘以 \dot{I}_r ，得：

$$|(-1/2) Z_{set} \dot{I}_r + \dot{U}_r| \leq |(1/2) Z_{set} \dot{I}_r|$$

将 $Z_{set} = K_{ur}/K_{uv}$ 代入上，然后不等式两边同乘以 K_{uv} ，得

$$|(-1/2) K_{ur} \dot{I}_r + K_{uv} \dot{U}_r| \leq |(1/2) K_{ur} \dot{I}_r|$$

(二) 相位比较方式

方向阻抗继电器中被比较绝对值的两个电压为

$$\dot{A} = (1/2) K_{ur} \dot{I}_r, \quad \dot{B} = (-1/2) K_{ur} \dot{I}_r + K_{uv} \dot{U}_r$$

且 $\dot{A} \geq \dot{B}$ ，比较相位的两上电压为

$$\dot{C} = \dot{A} + \dot{B} = K_{uv} \dot{U}_r$$

$$\dot{D} = \dot{A} - \dot{B} = K_{ur} \dot{I}_r - K_{uv} \dot{U}_r$$

与 \dot{D} 的相位差角 θ 满足 $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 时，继电器动作。

§2 偏移特性阻抗继电器的特性及实现方法

一、为什么要采用偏移特性阻抗继电器

对于方向阻抗继电器，当在保护正方向附近发生三相短路时，由于 $\dot{U}_j = 0$ ，使 $Z_j = 0$ ，继电器将不动作，即出现所谓的“电压死区”。为此，我们提出了解决方向阻抗继电器“电压死区”的第一种方法：即采用偏移特性阻抗继电器。

二、偏移特性阻抗继电器的特性

偏移特性阻抗继电器特性圆是以 $(1/2) |Z_{set} + \alpha Z_{set}|$ 为半径，圆心 $Z_0 = (1/2) |Z_{set} - \alpha Z_{set}|$ 。保证正方向故障时，保护范围仍不变；反方向故障时有一定的保护范围。

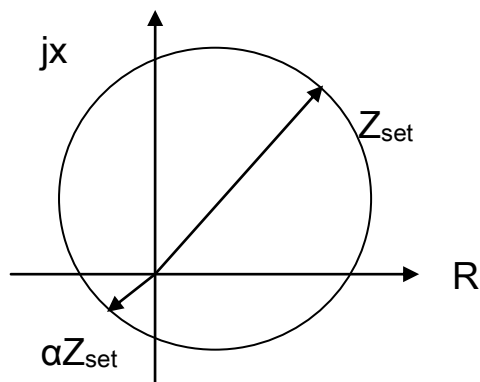


图 3-12

α 称之为偏移角，其值在 0-1 之间。当 $\alpha=1$ 时，即为全阻抗继电器； $\alpha=0$ 时，为方向阻抗继电器。一般 α 取为 10%-20%即可。

注意：偏移特性阻抗继电器不能作距离 I 段的测量元件。

三、偏移特性阻抗继电器的实现方法

(一) 幅值比较方式

Z_r 落入圆内条件：

$$|Z_r - Z_0| < |Z_{set} - Z_0|$$

将 $Z_0 = (1/2)|Z_{set} - \alpha Z_{set}| = (1-\alpha)|Z_{set}|/2$ 代入上式，得：

$$|Z_r - (1-\alpha) K_{ur} \dot{I}_r / 2| \leq |(1+\alpha) Z_{set} / 2|$$

令 $Z_{set} = K_{ur} / K_{UV}$ ，并将上式两边同乘以 $K_{UV} \dot{I}_r$ ，得

$$|K_{UV} \dot{I}_r - (1-\alpha) K_{ur} \dot{I}_r / 2| \leq |(1+\alpha) K_{UV} \dot{I}_r / 2|$$

(二) 相位比较方式

$$\dot{A} = (1+\alpha) K_{ur} \dot{I}_r, \quad B = K_{UV} \dot{U}_r - (1-\alpha) K_{ur} \dot{I}_r / 2$$

且 $|\dot{A}| \geq |B|$ 时，继电器动作

$$C = \dot{A} + B = \alpha K_{ur} + K_{UV} \dot{U}_r$$

$$D = \dot{A} - B = \alpha K_{ur} - K_{UV} \dot{U}_r$$

§ 3 插入电压的形成及其作用

一、插入电压的形成

(一) 记忆回路

如教材 P₉₅ 图 3-17 所示，记忆回路由 R_j 、 C_j 、 L_j 组成的串联谐振， \dot{U}_{ch} 取自 R_j 两端。正常运行时， \dot{U}_{ch} 与输入电压 \dot{U}_j 同相位；当故障 $\dot{U}_j=0$ 时，在一定的时间内， \dot{U}_{ch} 存在并保持与故障前同相位。

(二) 引入第三相电压

假设在保护安装处附近正方向 AB 两相短路时，引入第三相电压 \dot{U}_c ，它

通过阻值很大的电阻 R_5 引到 C_j 与 L_j 之间，见教材 P₉₅ 图 3-17。

通过分析：可以得出结论，此时所获得的 \dot{U}_{ch} 与 \dot{U}_j 同相位。

二、插入电压的作用

(一) 消除正方向出口短路时方向阻抗继电器的“电压死区”。

(二) 可以防止在记忆作用消失后，在保护安装处背后（反方向）近处两相短路时，保护可能出现的误动作。

如教材 P₉₆ 图 3-19 所示，当保护反方向出口 AB 两相短路时， $\dot{U}_{AB}^{(2)}=0$ 。经 YH 反应到二次侧，应有 $\dot{U}_{ab}^{(2)}=0$ ，即 $\dot{U}_j=0$ 。

因此，即使记忆作用消失，保护也不会误动，但实际情况由于继电器端子上所有相位不定的不平衡电压，有可能使保护误动作。

当保护反方向 AB 两相短路时，虽然 $\dot{U}_{ab}^{(2)}=0$ ，但 \dot{U}_{ch} 、 \dot{U}_{ca} 相当高，在二次回路中产生了电流 \dot{i}_{ch} 、 \dot{i}_{ca} ，考虑负载及导线不可能完全对称，于是可能使 $\dot{i}_{ch} \neq \dot{i}_{ca}$ ，使 $\dot{U}_{ch} \neq \dot{U}_{ca}$ ，故 $\dot{U}_{ab} \neq 0$ ，而且该电压的大小和相位是不定的，当记忆作用消失后，保护可能误动。

§ 4 阻抗继电器的精确工作电流

上面对阻抗继电器动作特性的分析，都是从理想条件出发的，即认为执行元件灵敏性高，动作电压为 0；认为二极管的正向压降为 0，于是认为继电器动作中与电压和电流比值 (Z_j) 有关，而与电流大小无关。这些实际都是不存在的，如 LZ-11 动作的边界条件为

$$|\dot{U}| - |\dot{I}Z_j| = U_0$$

$$\text{即：} |\dot{U}_{ch} + \dot{U}_d - \dot{U}_y| - |\dot{U}_{ch} - \dot{U}_d + \dot{U}_y| = U_0$$

式中 U_0 —整流比较回路中的二极管正向压降和执行元件动作电压之和。

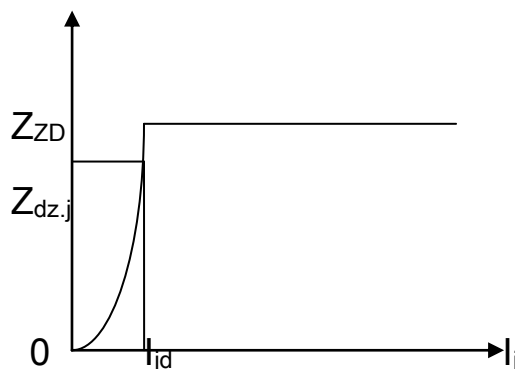
$$\text{又 } \Phi_{lm} = \Phi_d \quad \text{上式改写为}$$

$$-K_U \dot{U}_j + K_I \dot{I}_j - K_U U_j + K_I I_j = U_0$$

等式两边同时除以 $2 K_U U_j$ ，并且有 $U_j/I_j = Z_{dz,j}$ 及 $Z_{zd} = K_I/K_U$ 有

$$Z_{dz,j} = Z_{zd} - U_0 / (2 K_U U_j)$$

根据上式便可用出 $Z_{dz,j} = f(I_j)$ 关系曲线，如图 17-1 所示。



一、精确工作电流概念

对应图 3-1 所示曲线中，当 $Z_{dz,j} = 0.9 Z_{zd}$ 时通过继电器的电流，称为全阻抗继电器的精确工作电流，记作 I_{jd} 。

精确工作电流是阻抗继电器的一个重要指标，同时它也是反应灵敏性的一个指标， I_{jd} 越小， U_0 越小。继电器灵敏性越高。

二、影响精确工作电流的因素

将 $Z_{dz,j} = 0.9 Z_{zd}$ 、 $I_j = I_{jd}$ 代入上式，即可求得精确工作电流为

$$I_{jd} = U_0 / (0.2 K_I)$$

1、 I_{jd} 与执行元件的灵敏性有关，通过直流整流或克服二极管管压降来降低 I_{jd} 。

2、 I_{jd} 与 K_I 成反比，在一定 Z_{zd} 时，尽量选用较大的 K_I 的，保证 I_{jd} 足够小。

3、在 DKB 中采用补偿措施，提高 K_I ，减小 I_{jd} 。

§ 5 作业

补充习题

1、方向阻抗继电器的特点是什么？

2、解释 Z_{set} 、 $Z_{op.r}$ 、 Z_r 的含义？

- 3、精确工作电流有什么实际意义？
- 4、如何解决方向阻抗继电器的电压死区问题？

授课课次：18

【教学内容】 阻抗继电器的接线方式。

【教学目的】 通过教学，使学生掌握各种阻抗接线方式的特点及适用范围。

【教学重点】 对阻抗继电器接线方式的要求；各种阻抗继电器接线方式的原理及适用范围。

【教学难点】 反应接地故障的阻抗继电器接线方式的原理。

【教学过程】

§0 复习回顾及提问

1. 方向阻抗继电器的工作特点？
2. 解释 Z_{set} 、 $Z_{op.r}$ 、 Z_r 的含义？
3. 解决方向阻抗继电器“电压死区”的第二种方法是什么？
4. 为什么要引入精确工作电流的概念？精确工作电流是如何来衡量阻抗继电器的性能的？

§1 对阻抗继电器接线方式的要求

一、能正确进行距离测量

即从理论上讲，通过这种接线方式能使阻抗继电器感受阻抗与短路距离成正比，并与电网运行方式等其它因素无关。

二、用一个继电器能正确反应多种类型的故障

也就是说，通过所选用的接线方式应尽可能的对各种类型的短路故障进行正确的距离测量，这样就能简化保护装置结构，提高经济性。

三、接线简单、调试方便

实际上很难找出一种接线方式能完全满足一、二的要求，在工程上只能根据阻抗继电器所完成的任务，选出一种较好的接线方式。在选择接线时，可将阻抗继电器的使用分成以下三类：

- 1、测量用阻抗继电器
- 2、起动用阻抗继电器
- 3、选相用阻抗继电器

§2 反应相间故障的阻抗继电器的接线方式

一、接入相间电压和相电流差的 0° 接线方式

所谓 0° 接线是指假定同一相的相电压与相电流相位即 ($\cos\Phi=1$)，此时加在继电器端子上的电压 \dot{U}_j 与电流 \dot{I}_j 的相位差为 0° 。该接线方式需三只阻抗

继电器，三个阻抗继电器所加电压与电流如表 16-1 所示：

表 16-1 0° 接线方式时，阻抗继电器所加电压与电流

继电器编号	\dot{U}_j	\dot{I}_j
1ZKJ	\dot{U}_{AB}	$\dot{I}_A - \dot{I}_B$
2ZKJ	\dot{U}_{BC}	$\dot{I}_B - \dot{I}_C$
3ZKJ	\dot{U}_{CA}	$\dot{I}_C - \dot{I}_A$

下面分析采用这种接线方式的阻抗继电器，在发生各种相间故障时的测量阻抗：

1、三相短路时

以 1ZKJ 为例，设 $d^{(3)}$ 至保护安装处之间的距离为 L ，线路每公里的正序阻抗为 Z_1 ，则保护安装处的电压应为

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B = \dot{I}_A Z_1 L - \dot{I}_B Z_1 L = (\dot{I}_A - \dot{I}_B) Z_1 L$$

1ZKJ 的测量阻抗 $Z_{j1}^{(3)}$ 为

$$Z_{j1}^{(3)} = \dot{U}_{AB} / (\dot{I}_A - \dot{I}_B) = Z_1 L$$

2、两相短路时

以 2ZKJ 为例，其所加电压为

$$U_j^{(2)} = \dot{U}_{BC}^{(2)} = \dot{I}_B^{(2)} Z_1 L - \dot{I}_C^{(2)} Z_1 L = (\dot{I}_B^{(2)} - \dot{I}_C^{(2)}) Z_1 L$$

2ZKJ 的测量阻抗为

$$Z_{j1}^{(2)} = \dot{U}_{BC}^{(2)} / (\dot{I}_B^{(2)} - \dot{I}_C^{(2)}) = Z_1 L$$

3、中性点直接接地电网中两相接地短路时

$$Z_{j1}^{(1.1)} = \dot{U}_{j2}^{(1.1)} / \dot{I}_{j2}^{(1.1)} = \dot{U}_{BC}^{(1.1)} / (\dot{I}_B^{(1.1)} - \dot{I}_C^{(1.1)}) = Z_1 L$$

结论：对于 0° 接线方式，在电网同一地点发生各种相间故障时，接于故障相间的阻抗继电器测得的阻抗相同，而且测得的阻抗只与故障点至保护安装处的距离成正比。

二、接入相间电压和相电流的 30° 接线方式

反应相间故障的阻抗继电器的 30° 接线方式有 -30° 和 $+30^\circ$ 接线方式两种， 30° 接线方式时，阻抗继电器所加电压与电流如表 18-2 所示。

表 18-2 30° 接线方式时，阻抗继电器所加电压与电流

继电器编号	-30° 接线		$+30^\circ$ 接线	
	\dot{U}_j	\dot{I}_j	\dot{U}_j	\dot{I}_j
1ZKJ	\dot{U}_{AB}	$-\dot{I}_B$	\dot{U}_{AB}	\dot{I}_A
2ZKJ	\dot{U}_{BC}	$-\dot{I}_C$	\dot{U}_{BC}	\dot{I}_B
3ZKJ	\dot{U}_{CA}	$-\dot{I}_A$	\dot{U}_{CA}	\dot{I}_C

下面以 -30° 接线方式为例，对各种相间故障时阻抗继电器的测量阻抗进行分析：

1、三相短路时

以 1ZKJ 为例

$$Z_{j1}^{(3)} = \dot{U}_{AN} / -\dot{I}_B = (\sqrt{3}Z_1L \dot{I}_A \angle 30^\circ) / \dot{I}_A \angle 60^\circ = 3Z_1L \angle -30^\circ$$

2、两相短路时

以 1ZKJ 为例

$$Z_{j1}^{(2)} = \dot{U}_{AN} / -\dot{I}_B = 2Z_1L \dot{I}_A \dot{I}_A = 2Z_1L$$

结论：采用 -30° 接线的阻抗继电器，对不同形式的故障，其测量阻抗的大小与相位均不相同。

注意：1⁰ 对于全阻抗继电器， Z_{zdj} 与 Φ_d 无关，三相短路时， $Z_j^{(3)} = \sqrt{3}Z_1L \angle -30^\circ$ ， $Z_j^{(2)} = 2Z_1L$ ，两相短路时保护范围将缩小。

2⁰ 对于方向阻抗继电器， $Z_{zd} = 2Z_1L$ ， $\Phi_{lm} = \Phi_d$ ，则三相短路与两相短路时的保护范围是相同的。

3⁰ 30° 接线方式时， $Z_j^{(3)} = \sqrt{3}Z_1L \angle 30^\circ$ ， $Z_j^{(2)} = 2Z_1L$ 。

4° 随着输电线路长度增加， Z_{zd} 必然增大；随着线路输送功率的增大，可靠地躲过负荷阻抗 Z_{fh} 又要求 Z_{zd} 缩小。为解决这种矛盾，0° 接线方式不易满足，采用 -30° 接线方式，在输电线路送电端可解决次矛盾；在输电线路受电端，采用 +30° 接线方式可解决。

§ 3 反应接地故障的阻抗继电器接线方式

以 A 相阻抗继电器的测量阻抗进行分析：

$$\dot{U}_j = \dot{U}_A^{(1)}$$

$$\dot{I}_j = \dot{I}_A^{(1)}$$

$$\text{又 } \dot{U}_A^{(1)} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0$$

$$\dot{U}_{dA}^{(1)} = \dot{U}_{d1} + \dot{U}_{d2} + \dot{U}_{d0}$$

$$\dot{I}_A^{(1)} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{d1} + \dot{I}_1 Z_1 L$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_{d2} + \dot{I}_2 Z_2 L = \dot{U}_{d2} + \dot{I}_2 Z_1 L$$

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_{d0} + \dot{I}_0 Z_0 L$$

因此， $\dot{U}_A^{(1)} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 = \dot{U}_{d1} + \dot{U}_{d2} + \dot{U}_{d0} + Z_1 L (\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + Z_0 \dot{I}_0 / Z_1)$

考虑到 A 相单相接地时， $\dot{U}_{d1} + \dot{U}_{d2} + \dot{U}_{d0} = 0$ ， $\dot{I}_A^{(1)} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0$ ，所以

$$\dot{U}_A^{(1)} = Z_1 L (\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0 - \dot{I}_0 Z_0 L / Z_1)$$

$$= Z_1 L (\dot{I}_A^{(1)} + (Z_0 - Z_1) \dot{I}_0 / Z_1)$$

故单相接地时，阻抗继电器的测量阻抗为

$$Z_j = \dot{U}_A^{(1)} / \dot{I}_A^{(1)} = Z_1 L + \dot{I}_0 (Z_0 - Z_1) \dot{I}_0 / \dot{I}_A^{(1)}$$

可见，反应接地故障的阻抗继电器若接入相电压、相电流则其测量阻抗不是一常数，必须采取措施予以消除该影响。

参见教材 P₁₀₉ 图 6-32 所示的接线方式，即给阻抗继电器通带零序补偿的电流。

§ 4 作业

补充习题

授课课次：19

【教学内容】反映突变量阻抗继电器；选相原理。

【教学目的】通过教学，使学生掌握反映突变量阻抗继电器的工作原理及几种不同选相原理。

【教学重点】反映突变量阻抗继电器的工作原理及几种不同选相原理。

【教学难点】原理分析过程。

【教学过程】

§0 复习回顾及提问

1. 对阻抗继电器接线方式的要求？
2. 各种阻抗继电器接线方式的特点及适用范围？

§1 反映突变量阻抗继电器

一、反映突变量的接地阻抗继电器

1、概念：指反映阻抗继电器工作电压 U_{OP} 相位突变或幅值突变构成的阻抗继电器。

2、突变阻抗继电器测量的是工作电压 U_{OP} 前、后周期的相位变化，在稳定状态下阻抗继电器不能动作，只有在发生短路故障后的第一个周期才有可能动作。

3、动作方程：

反映工作电压 U_{OP} 相位突变的阻抗继电器一般动作方程为：

$$90^{\circ} \leq \arg U_{OP} / U_{OP[0]} \leq 270^{\circ}$$

反映接地短路故障突变阻抗继电器的动作方程为：

$$90^{\circ} \leq \arg [U_{\varphi} - (I_{\varphi} + 3KI_0) Z_{set}] / U_{OP. \varphi[0]} \leq 270^{\circ}$$

二、工频变化量阻抗继电器

1、概念：指由反映工作电压 U_{OP} 的幅值构成的突变量阻抗继电器，就称为工频变化量阻抗继电器。

2、构成原理：

设在图 3-11 中保护正方向 K 点发生了 A 相接地，作出故障分量网络如图 3-12 所示。

如果 $(Z_{M0}-Z_{M1})/3Z_{M0}=K$ ，则在过渡电阻 $R_F=0$ 时流过保护安装处的测量电流工频变化量可表示为：

$$\Delta(I_A+3KI_0) = U_{KA.eq}/(Z_{M1}+Z_m)$$

其中 $Z_m=Z_{MK1}$ 。

$$\Delta U_A = -\Delta(I_A+3KI_0) Z_{M1}$$

阻抗继电器工作电压变化量为

$$\begin{aligned} \Delta U_{op.A} &= \Delta[U_A - (I_A+3KI_0) Z_{set}] \\ &= -\Delta(I_A+3KI_0) Z_{M1} - \Delta(I_A+3KI_0) Z_{set} \\ &= -(Z_{M1}+Z_{set})/(Z_{M1}+Z_m) U_{KA.eq} \end{aligned}$$

可见，正向区外 A 相接地短路故障时， $Z_m > Z_{set}$ ，所以 $\Delta U_{op.A} < U_{KA.eq}$ ；保护区末端 A 相接地短路故障时， $Z_m = Z_{set}$ ，所以 $\Delta U_{op.A} = U_{KA.eq}$ ；正向区内 A 相接地短路故障时， $Z_m = Z_{set}$ ，所以 $\Delta U_{op.A} > U_{KA.eq}$ 。 $U_{KA.eq}$ 的变化如图 3-13 所示。

当在反方向上发生 A 相接地短路，流过保护安装处的电流由被保护线路流向母线，则 M 母线上 A 相电压的工频变化量为

$$\Delta U_A = -\Delta(I_A+3KI_0) Z_{N1}$$

而 $\Delta(I_A+3KI_0) = U_{KA.eq}/(Z_{N1}+Z_m)$

$$\begin{aligned} \Delta U_{op.A} &= \Delta[U_A + (I_A+3KI_0) Z_{set}] \\ &= -\Delta(I_A+3KI_0) Z_{N1} - \Delta(I_A+3KI_0) Z_{set} \\ &= -(Z_{N1}-Z_{set})/(Z_{N1}+Z_m) U_{KA.eq} \end{aligned}$$

$U_{KA.eq}$ 的变化如图 3-14 所示。

因此，继电器的动作方程为

$$|\Delta U_{OP. \phi}| \geq U_{set}$$

该继电器不仅能判别短路故障的方向，而且接地靠近保护安装处时，因 $\Delta U_{OP.\varphi}$ 越大，所以继电器越灵敏。 U_{set} 实际上是继电器工作电压 $U_{OP.\varphi}$ 的记忆值，一般取1.15倍额定相电压。

3、动作特性。其中：

1) 正向单相接地时的动作特性

$$Z_m \leq -Z_{M1} + (Z_{M1} + Z_{set})e^{j\theta}$$

如图 17-5 所示。

2) 反向单相接地时的动作特性

$$Z_m \leq -Z_{N1} + (Z_{N1} - Z_{set})e^{j\theta}$$

如图 3-16 所示。

三、工频变化量相间方向阻抗继电器

与工频变化量阻抗继电器有相同的动作特性，工作特点也相同。

§2 选相原理

一、概述

1、选相的目的：为了实现单相重合闸和综合重合闸。

2、对选相元件的要求为：

1) 在保护区内发生任何形式的短路故障时，能判断故障相别，或判断出是单相故障还是多相故障。

2) 单相接地故障时，非故障相选相元件可靠不动作。

3) 在正常运行时，选相元件应该不动作。

4) 动作速度要快。

3、故障选相判断的主要流程：

1) 判断是接地短路还是相间短路。

2) 如果是接地短路，先判断是否单相接地。

- 3) 如果不是单相接地，则判断哪两相接地。
- 4) 如果不是接地短路，则先判断是否三相短路。
- 5) 如果不是三相短路，则判断是哪两相短路。

二、相电流差工频变化量选相

相电流差工频变化量选相元件是在系统发生故障时利用两相电流差的变化量的幅值特征来区分各种类型故障。

1、单相接地故障

幅值特征：两相非故障相电流差等于零。

2、两相短路

幅值特征：两相故障相电流差值最大。

3、三相短路

幅值特征：三个两相电流差故障分量相等。

4、两相接地短路

幅值特征：两相故障相电流差值最大。

由此可见，一般情况下，两相接地短路的幅值特征与两相短路相同，即两故障相电流差最大。为了进一步区分，可以通过检查是否有零序电流或零序电压存在；也可以通过检查是否有零序电流或电压的变化量存在来确定是否为接地短路。

三、余弦电压 $U\cos\varphi$ 选相

1、余弦电压 $U\cos\varphi$ 特性

如图 3-17 所示 K 点发生相间短路故障时，对于回路方程有：

$$U_{\varphi\varphi} = U_{\text{arc}} + I_{\varphi\varphi} Z_{L1}$$

$$E_{\varphi\varphi} = U_{\text{arc}} + I_{\varphi\varphi} (Z_{L1} + Z_{M1})$$

根据以上式子作出相量图如图 3-18 所示。通过相量图，可以得到

$$U_{\text{arc}} = U_{\varphi\varphi} \cos(\varphi + 90^\circ - \Phi_{L1})$$

$$\varphi = \arg U_{\varphi\varphi} / I_{\varphi\varphi}$$

如果略去线路阻抗 Z_{L1} 的电阻分量，即 $\phi_{L1} = 90^\circ$ ，则 $U_{arc} = U_{\varphi\varphi} \cos\varphi$

若取 $U_{arc} = 0.05E_{\varphi\varphi}$ ，则 $R_{arc} = U_{arc} / I_{\varphi\varphi} = 0.05(Z_{M1} + Z_{L1})$

于是有：

$$Z_m = U_{\varphi\varphi} / I_{\varphi\varphi} = R_{arc} + Z_{L1} = Z_{L1} + 0.05(Z_{M1} + Z_{L1})$$

可以作出 Z_m 的特性，也称 $U \cos\varphi$ 特性。

2、相间阻抗继电器的测量阻抗

BC 两相接地短路故障时的测量阻抗如图 3-19 所示。

3、选相

$U \cos\varphi$ 的动作判据为

$$-0.03U_N < U \cos\varphi < 0.08U_N$$

测量 φ 角就可实现 $U \cos\varphi$ 元件。

四、用 Clarke 分量的故障判别

Clarke 分量被分别称为 0、 α 及 β 分量。

对于 A 相接地短路： $I_\alpha = 2I_0$ 及 $I_\beta = 0$ 。

BC 两相对地短路： $I_\alpha = -I_0$ 。

BC 相间短路： $I_\alpha = I_0$ 及 $I_0 = 0$ 。

三相短路： $I_0 = 0$ 。

如果以 B、C 相作为参考相且可以测到中性点电流 I_n ，则可以根据 I_n 为零与否的情况将上述条件转化为两大类：

1、如果 I_n 不等于零（接地短路），则 $I_b - I_c = 0$, A 相对地故障； $I_a - I_c = 0$, B 相对地故障； $I_b - I_a = 0$, C 相对地故障； $2I_a - I_b - I_c + I_n = 0$, BC 两相对地短路； $2I_b - I_c - I_a + I_n = 0$, CA 两相对地短路； $2I_c - I_a - I_b + I_n = 0$, AB 两相对地短路。

2、如果 I_n 等于零（相间短路），则 $2I_a - I_b - I_c = 0$, BC 两相短路； $2I_b - I_c - I_a$

$=0$,CA 两相短路 ; $2I_c - I_a - I_b = 0$,AB 两相短路.如果上述三个式子均不成立 , 则为三相短路。

授课课次：18、19

【教学内容】影响阻抗继电器正确测量的因素。

【教学目的】通过教学，使学生掌握影响阻抗继电器正确测量的因素及其对策。

【教学重点】故障点过渡电阻、分支电流、系统振荡、电压回路断线对阻抗继电器正确测量的影响及解决措施。

【教学难点】系统振荡对阻抗继电器正确测量的影响。

【教学过程】

§0 复习回顾及提问

1. 对阻抗继电器接线方式的要求？
2. 各种阻抗继电器接线方式的特点及适用范围？

§1 故障点过渡电阻的影响

一、什么是过渡电阻

短路点的过渡电阻 R_{gd} 是指相间短路或接地短路时，短路电流从一相流到另一相或从相导线流入地所途经的电阻。在相间短路时，过渡电阻主要为电弧电阻；在接地短路时，过渡电阻除电弧电阻外，还包括杆塔接地电阻等，其中杆塔接地电阻等是过渡电阻的主要成份。

二、过渡电阻对距离保护测量阻抗和保护区的影响

过渡电阻的存在使阻抗继电器的测量阻抗 Z_j 增大，保护范围缩小，使保护的灵敏性降低。具体来讲：

- 1、不同安装地点的距离保护的测量阻抗影响程度不同：离故障点越近的保护受过渡电阻的影响越大，另外，被保护的线路越短，保护的整定值越小，其受过渡电阻的影响也越大。
- 2、不同动作特性的阻抗继电器，受过渡电阻影响的程度也不同，方向阻抗继

电器受过渡电阻的影响最严重，偏移特性阻抗继电器次之，而全阻抗继电器受过渡电阻的影响相对最小。

三、减小过渡电阻影响的措施

电弧电阻 R_{gd} 可由下式求得

$$R_{gd}=1050L_{dh}/I_{dh}(\Omega)$$

由于故障后电弧长度 L_{dh} 和电弧电流 I_{dh} 的大小都是随时间变化的。在短路开始瞬间， I_{dh} 最大， L_{dh} 最小，故 R_{gd} 最小，此后，由于短路电流的衰减，气流和电动力的作用，使 L_{dh} 拉长， R_{gd} 逐渐增大，大约经 0.1-0.15S 后， R_{gd} 急剧上升。

根据过渡电阻的上述特点可知， R_{gd} 对瞬时动作的距离 I 段的影响不大。而对距离 II 段的影响可采用“瞬时测定”回路或采用偏移特性阻抗继电器作其测量元件来解决。

所谓瞬时测定，就是把距离 II 段测量元件的最初状态通过起动中间继电器，通过中间继电器的自保持将动作固定下来，当电弧电阻增大，即使距离 II 段的测量元件返回，保护仍能以正常时限动作于跳闸。

分析教材 P₁₁₂ 图 6-35 瞬时测定的原理接线图。

注意：瞬时测定一般只用于单回线辐射形电网的距离 II 段上。

§ 2 分支电流的影响

当保护安装处与故障点间的母线上接有电源线路，负荷或平行线时，即出现分支电流，分支电流的存在将使阻抗继电器的测量阻抗增大或减小，从而使其保护范围缩小或扩大。

一、助增电流的影响

由于助增电流的存在，使距离的测量阻抗增大了，保护范围缩小了，保护的灵敏性降低了，但并不影响与下一线路距离配合的选择性。为了保证距离的保护范围，可在整定计算动作阻抗时，引入一个大于 1 的分支系数，适当

增大动作阻抗，以抵消由于助增电流的存在保护范围缩小的影响。分支系数的引入应取各种可能的运行方式下的最小值。同时，校验灵敏系数时，也应引入一个大于 1 的分支系数，且应按使分支系数为最大的运行方式进行。

二、汲出电流的影响

由于汲出电流的存在，使得测量阻抗减小了，因而其保护范围扩大了，故可能导致保护无选择性动作。为防止这种无选择性动作，应引入一个小于 1 的分支系数。

§ 3 系统振荡的影响及振荡闭锁回路

一、系统振荡对阻抗继电器工作的影响

电力系统正常运行时，系统各电源之间同步运行，电源电势之间的相角差为常数。当系统因短路切除太慢或遭受较大冲击时，并列运行的各电源之间分支同步，系统发生振荡时，各电源电势之间的相角差随时间而变化，系统中出现幅值以一同期变化的电流，该电流称为振荡电流。与此同时，系统各点电压互感器幅值了随时间变化。

以教材 P₁₁₃ 图 6-38 所示的双侧电源辐射开线路振荡时分析振荡电流及各点电压情况。

取电源电势 \dot{E} 为参考相量，假定 $E_I = E_{II}$ ，则 $\dot{E}_{II} = \dot{E} e^{-j\delta}$ ， δ 在 $0^\circ - 360^\circ$ 之间作周期性变化，设系统各元件的阻抗角相等，均为 Φ_S ，取振荡电流的正方向为流向，则振荡时振荡电流为

$$\dot{I}_{zh.d} = (\dot{E}_I - \dot{E}_{II}) / Z_\Sigma = \dot{E}_I (1 - e^{-j\delta}) / Z_\Sigma$$

振荡电流的有效值为

$$I_{zh.d} = (2E |\sin \delta / 2|) / Z_\Sigma$$

振荡电流有效值随 δ 的变化参见教材 P₁₁₄ 图 6-39。

在振荡时，系统各点电压也随 δ 角的变化而变化，按所选正方向。

$$\dot{U}_A = \dot{E}_I - \dot{I}z_{hd} Z_I$$

$$\dot{U}_B = \dot{E}_{II} + \dot{I}z_{hd} Z_{II}$$

母线 A、B 及振荡中心电压 \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 及 \dot{U}_Z 的有效值随 δ 的变化情况见教材 P₁₁₄ 图 6-39 (b)。

对于母线 A 处的阻抗继电器来说，加入的电流为 $\dot{I}z_{hd}$ 。电压为 \dot{U}_A 系统振荡时，该继电器的测量阻抗为

$$\begin{aligned} Z_j &= \dot{U}_A / \dot{I}z_{hd} = (\dot{E}_I - \dot{I}z_{hd}) / \dot{I}z_{hd} = Z_\Sigma / (1 - e^{-j\delta}) - Z_\Sigma \\ &= (1/2 - m) Z_\Sigma - j1/22 \text{ctg}(\delta/2) Z_\Sigma \end{aligned}$$

Z_j 两端的轨迹为一曲线，参见教材 P₁₁₅ 图 6-40。

阻抗继电器受系统振荡影响的程度取决于两个因素，即距离保护的安装地点和阻抗继电器的动作特性。

- 1、系统振荡的影响与阻抗继电器动作特性的关系：从躲过系统振荡的观点出发，采用方向阻抗继电器比采用全阻抗继电器好。
- 2、系统振荡的影响与保护安装地点的关系，只有 m 满足条件 $1/2 \geq m \geq 1/2 - Z_{zd} / Z_\Sigma$ 处的距离保护才会受系统振荡的影响而误动。

二、振荡闭锁回路

为防止系统振荡时距离保护的误动作，在距离保护中设了振荡闭锁回路。振荡闭锁回路应做到：

- 1、系统没有发生故障而振荡时，应可靠地将保护闭锁。
- 2、在保护范围内发生短路时，不论系统有无振荡，应快速地将保护开放。

为此，振荡闭锁回路应能正确区分系统是振荡还是故障。目前振荡闭锁回路的启动元件主要采用两种原理来区分系统的振荡与故障：一种是用系统中有无负序分量出现来区分；另一种是用系统中负序分量是否突变的来区分。

§ 4 电压回路断线的影响及断线闭锁回路

一、电压回路断线的影响

二次电压回路断线，将造成距离保护失去电压，此时，在负荷电流的作用下，阻抗继电器的测量阻抗为零，故有可能误动。

二、断线闭锁回路的主要元件—断线闭锁继电器 DBJ。

断线闭锁回路的工作情况如下：

- 1、正常时，DBJ 不动作。
- 2、当电网发生接地故障时，DBJ 不动作。
- 3、当二次回路断线时，DBJ 动作。

§5 作业

补充习题

- 1、哪些因素能影响阻抗继电器的正确测量？
- 2、受系统振荡影响最大的是哪种圆特性阻抗继电器？受过渡电阻影响最大的是哪种圆特性阻抗继电器？

授课课次：20

【教学内容】距离保护的整定计算。

【教学目的】通过教学，使学生掌握距离保护整定计算方法。

【教学重点】距离 I、II、III 段保护整定计算方法。

【教学难点】距离保护实际中的整定计算。

【教学过程】

§ 0 复习回顾及提问

1. 影响阻抗继电器正确测量的因素有哪些？
2. 决定过渡电阻影响大小的因素有哪些？
3. 决定系统振荡影响大小的因素有哪些？如何解决？
4. 如何解决分支电流、电压回路断线对阻抗继电器正确测量的影响呢？

§ 1 距离保护的整定计算

距离保护装置的整定计算包括各段 (I、II、III 段) 阻抗测量元件的整定计算，振荡闭锁起动元件的整定计算。相电流元件的整定计算等。本节只介绍各段阻抗元件的整定计算。

前已述及，距离保护的工作原理与电流保护的基本相同，在学习其整定方法时，可与三段式电流保护相对照。

一、保护动作阻抗 Z_{op} 一次值的整定计算

(一) 距离 I 段

距离保护 I 段是靠动作阻抗整定取得选择性的，因而它应避开下段线路起始点短路阻抗来整定其动作阻抗，以教材 P₁₂₀ 图 6-45 所示多电源辐射电网为例，讨论保护 I 的整定。

亦即距离 I 段的动作阻抗应躲过相邻下一元件首端 k1 点或 k2 点的短路阻抗来整定，即：

$$Z_{opI} = K_{rel} Z_1 L_{AB}$$

式中 K_{rel} —可靠系数，一般取 0.8—0.85

Z_1 —线路单位正序阻抗。

距离 I 段瞬时动作，固有动作时间为 0.04S，一般不超过 0.1S。

(二)距离 II 段

II 段阻抗元件的整定计算按与相邻下一线路 I 段或 II 段保护相配合整定，在如图 6-45 所示情况，整定原则：

1、与相邻下线路 BC 的保护配合

设 BC 线上也装设距离保护，其 I 段阻抗元件动作整定值为 $Z_{op,rI}$ 。则：

$$Z_{opII} = K_{rel} (Z_1 L_{AB} + K_{fz,BC} Z_{op,rI})$$

式中： $K_{fz,BC}$ —考虑分支电源供给的助增电流影响的分支系数。取各种可能运行方式下的最小值。

2、与相邻变压器线路的瞬时保护配合

由于变压器瞬时保护区延伸到二次侧出口，故应避开图 26-1 中 d3 短路时适中短路阻抗整定，则：

$$Z_{op1II} = K_{rel, B} (Z_1 L_{AB} + K_{fz,B} Z_{B,min})$$

式中： $K_{fz,B}$ —考虑分支电源助增电流影响的分支系数；

$Z_{t,min}$ —变压器的最小等值阻抗；

$K_{rel, T}$ —与变压器配合的可靠系数，一般取为 0.7。

综合 1、2，取其中较小者作为保护 I 和距离 II 段动作阻抗的整定值。

3、动作时限 $t_{1II} = t_{2B} + \Delta t$ 或 $t_{1II} = t_B + \Delta t$ ，一般取 $t_{1II} = 0.5s$ 。

4、灵敏度校验

$$K_{sen} = Z_{op II} / Z_1 L_{AB} \geq 1.3 \sim 1.5$$

选被保护线路 AB 末端短路的条件校验。

如果灵敏系数不满足要求时，可按与相邻线路的距离 II 段相配合的条件整定动作阻抗，即：

$$Z_{op II} = K_{rel} (Z_1 L_{AB} + K_{fz.B} Z_{dz.2 II})$$

动作时限 $t_1 II = t_2 II + \Delta t$

(三) 距离 III 段

距离 III 段的动作阻抗应按躲过最小负荷阻抗整定，即：

$$Z_{op III} = Z_{L.min} / (K_{rel} \times K_{re} \times K_{ss})$$

式中： K_{rel} —可靠系数，取 1.2 ~ 1.3。

K_{re} —阻抗继电器的返回系数，取 1.15 ~ 1.3。

K_{ss} —电动机自起动系数，其值大于 1。

$Z_{L.min}$ —最小负荷阻抗。

$$Z_{L.min} = 0.9 U_{N.X} / I_{L.max}$$

式中： $U_{N.X}$ —电网的额定电压；

$I_{L.max}$ —未考虑电动机自起动的最大负荷电流。

灵敏度校验：

作近后备时

$$K_{sen} = Z_{op.r III} / Z_1 L_{AB} \geq 1.5$$

作远后备时

$$K_{sen} = Z_{op.r III} / (Z_1 L_{AB} + K_{fz.BC} Z_1 L_{AB}) \geq 1.2$$

式中： $K_{fz.BC}$ —分支系数，取最大值。

动作时限按阶梯原则进行整定。

值得指出的是：当距离的测量元件采用方向阻抗继电器比采用全阻抗继电器时，灵敏度要提高许多。

二、阻抗继电器动作阻抗的计算及整定方法

$$Z_{op.r} = K_{co} Z_{op} n_{TA} / n_{TV}$$

式中： K_{co} —接线系数，对距离 I、II 段测量元件，当用 0° 接线方式时， $K_{co}=1$ ；对 III 段测量元件，有时采用 30° 接线方式时，则 $K_{co}=\sqrt{3}$ ；(若 I、II 段测量元件采用 30° 接线方式，则 $K_{co}=\sqrt{3}$) (全阻抗继电器)；对方向阻抗继电器， K_{co} 应取为 2。

式中： n_{TA} —电流互感器变比；

n_{TV} —电压互感器变比；

Z_{OP} —保护一次动作值。

继电器的整定阻抗：

$$Z_{OP.R} = K_I / K_U$$

§ 2 距离保护整定计算举例

参见教材 P₁₂₃ 例题。

§ 3 作业

P₁₈₈ 3-17 3-18

授课次数：21

【教学内容】期中考试。

授课次数：22

【教学内容】 概述;变压器的瓦斯保护和电流速断保护。

【教学目的】 通过教学，使学生掌握变压器可能出现的故障和不正常工作状态、变压器的继电保护；变压器的瓦斯保护和电流速断保护。

【教学重点】 变压器保护的配置情况；变压器瓦斯保护工作原理；变压器电流速断保护的整定原则。

【教学难点】 瓦斯继电器结构说明。

【教学过程】

§ 1 概述

电力变压器在电力系统中使用很普遍，而且是十分重要的电气设备。虽然变压器无旋转部件，结构较简单，运行可靠性较高，但实际运行中仍可能发生故障或异常运行状态，尤其是大容量变压器损坏，会给系统带来严重影响。

一、变压器可能发生的故障

分内部故障和外部故障。内部故障是指发生在变压器油箱内的线圈相间短路、接地短路或匝间短路，其中最常见的是线圈匝间短路，内部短路危害严重；外部故障常见的是油箱外绝缘套管的故障，它可导致引出线相间短路或对外壳之间的接地短路。

二、变压器可能发生的异常运行状态

主要有过负荷、外部短路引起的过电流，外部接地短路引起的中性点过电

压、油面降低及过电压或频率降低引起的过励磁等。

三、变压器保护

1、瓦斯保护

包括轻瓦斯、重瓦斯保护，用来反应油箱内各种短路故障及油面降低，轻瓦斯作用于信号，重瓦斯保护作用于瞬时跳开变压器各侧断路器。

2、纵差动保护或电流速断保护

纵差动保护或电流速断保护用来反应变压器油箱内或其引出线的短路故障。一般是当电流速断保护灵敏度不满足要求时，才考虑装设纵联差动保护。

3、过电流保护或负序电流保护

过电流保护用来反应外部相间短路引起的变压器过电流，同时是变压器内部相间短路的后备保护。当采用一般过电流保护而灵敏度不能满足要求时，可采用低电压启动的过电流保护或复合电压启动的过电流保护或负序电流保护。

4、零序电流保护

在电压为 110KV 及以上中性点直接接地电网中的变压器，一般应装设零序电流保护，作为变压器相邻下一元件接地短路的远后备保护，同时又作为变压器内部接地短路的后备保护。

5、过负荷保护

用来反应变压器的对称过负荷。

6、过励磁保护

对于大容量变压器，当短路时过电压达 10%~20%时，以防止过励磁而使差动误动而装设过励磁保护；当过电压更甚或频率降低时，用它防止由于过励磁而损坏变压器。

四、变压器保护的配置

1、对于容量为 630~1600KVA 等级的变压器，可配置电流速断、过电流、

重瓦斯、轻瓦斯、油温升高等保护，其中电流速断保护灵敏度不够可装设纵差动保护；800KVA 以下变压器可不装瓦斯保护。1000KVA 以下变压器可不设油温升高保护。

2、对于容量为 2000 ~ 16000KVA 等级的变压器，可配置纵差、复合电压起动的过电流、重瓦斯、轻瓦斯和油温升高保护。

3、对于厂用变压器，可配置电流速断和过电流保护。

§2 变压器的瓦斯保护

一、保护的作用

能反应油浸式变压器油箱内的各种故障，是变压器内部故障的主保护之一，但不能单独作为变压器的主保护。

二、保护的工作原理

该保护的主要构成元件为安装在变压器油箱与油枕之间联接管道上的 KG。当变压器油箱内发生短路故障时，短路电流及故障点电弧会使变压器油和绝缘材料受热扩散，通过 KG 进入油枕，当故障轻微时，产生的气体少，使 KG 的轻瓦斯触点闭合，保护为轻瓦斯，作用于发故障信号；当故障严重时大量气体产生，同时变压器油迅速膨胀，形成强烈的油流通过 KG 冲向油枕，使 KG 的重瓦斯触点闭合，保护为重瓦斯保护，作用跳各侧断路器并发事故信号。

三、瓦斯继电器 (WSJ)

目前，国产的瓦斯继电器中较为完善的是开口杯档板式 WSJ。变压器正常工作时，轻瓦斯部分的开口杯 5 处于上浮位置，干簧接点 15 断开。重瓦斯部分的档板 10 在弹簧 9 的保持下处于正常位置，双干簧接点 13 断开（此两对接点串联使用，以防受震使保护误动）当变压器油箱内发生轻微故障时，因油或绝缘材料分解而产生的气体聚集在瓦斯继电器的上部，迫使继电器内油

面下降，开口杯 5 随之下降，并沿顺时针方向转动，带动永久磁铁 4 靠近干簧接点 15，使之闭合接通，发出轻瓦斯信号。当变压器油箱内发生严重故障时，油箱内会出现大量气体引起的强烈油流冲击挡板 10，当油流速度达到整定值时，挡板 10 克服弹簧 9 的反作用力而倾斜到一定位置，由于固定在挡板上的永久磁铁 11 被转到靠干簧接点 13 的位置而使之闭合，于是发出重瓦斯保护的跳闸脉冲。

四、保护的整定

1、轻瓦斯保护动作值的大小用气体容积表示，整定范围为 250-300cm²。气体容积的调整可通过改变重锤 6 的位置来实现。

2、重瓦斯保护动作值的大小用油流速度来表示，整定范围为 0.6-1.5m/s，靠调节螺杆 14 以改变弹簧 9 的长度来整定。对于强迫油循环变压器，油速整定为 1.1-1.4m/s。

五、保护的原理接线图

说明以下几个问题：

1、采用具有自保持线圈的出口中间继电器的作用：由于 KG 是机械型继电器，其触点的通、断与油流的速度和大小有关，为防止因 KG 触点抖动而造成保护不能正常动作而装设带自保持线圈的出口中间继电器。

2、切换片 XB 的作用：通过 XB 来切换重瓦斯保护的动作结果，主要是在瓦斯保护作试验、新安装的变压器及经大修投运变压器应将重瓦斯保护切换至发信号回路。

六、对保护的评价

动作迅速、灵敏度高，特别是能反应油箱内部各种故障，接线简单；但不能反应油箱外部故障，所以不能单独作为主保护。

§ 3 变压器的电流速断保护

对于容量较小的变压器，当其过电流保护的動作时限大于 0.5S 时，可在电源侧装设电流速断保护，它与瓦斯保护配合，构成变压器的快速保护。

当变压器电源侧为直接接地系统时，保护采用完全星形接线；若为非直接接地系统时，则采用两相不完全星形接线。

整定计算

(一) 動作电流值

1、按躲过外部三相短路时流过变压器的最大短路电流整定，即：

$$I_{op} = K_{rel} I_{k.max}$$

式中： K_{rel} —可靠系数，对于 DL-10 继电器；取 1.3-1.4。

$I_{k.max}$ —变压器端部三相短路时，流过变压器的最大短路电流。

2、按躲过变压器空载投入时的励磁涌流整定，即：

$$I_{op} = (3-5) I_{e.t}$$

式中： $I_{e.t}$ —保护安装处变压器的额定电流。

选取 I_{op} 较大值作为保护動作电流值。

(二) 灵敏度校验

按保护安装处两相短路时最小短路电流来校验，即：

$$K_{sen} = I_{k.min}^{(2)} / I_{op} \geq 2$$

§ 4 作业

P₂₅₀ 6-1 6-2

授课课次：23

【教学内容】 变压器的纵差动保护（一）。

【教学目的】 通过教学，使学生掌握变压器纵差保护的工作原理、影响变压器纵差保护不平衡电流的因素及其解决措施。

【教学重点】 变压器纵差保护的工作原理、纵差保护不平衡电流的影响因素。

【教学难点】 纵差保护不平衡电流的影响及其消除因素。

【教学过程】

§0 复习回顾及提问

1. 变压器可能出现的故障和异常运行状态有哪些？
2. 变压器可以装设的继电保护有哪些？
3. 瓦斯保护的作用？优缺点分别是什么？
4. 变压器的电流速断保护如何整定计算？

§1 变压器纵差保护工作原理

变压器纵差保护用来反应变压器绕组、引出线、套管上的各种短路故障，是变压器的主保护。

如图 28-1 所示的变压器纵差保护的单相原理接线图。在变压器两侧装设

电流互感器 TA1 和 TA2，TA1 和 TA2 一次绕组同极性端均置于相同的一侧，二次绕组的不同极性端相连接，差动电流继电器 KD 并联在电流互感器 TA1 和 TA2 的变比，分别按变压器两侧的额定电流选择，即 $n_{TA1}=I_{eT.I}/5$ ， $n_{TA2}=I_{eT.II}/5$ 这样，在正常情况和外部故障时，流入继电器的电流为：

$$\dot{I}_r = \dot{I}_{2.I} - \dot{I}_{2.II} = \dot{I}_{1.I} / n_{TA1} - \dot{I}_{1.II} / n_{TA2} = 0$$

在内部故障时，流入继电器的电流为

$$\dot{I}_r = \dot{I}_{2.I} - \dot{I}_{2.II} = \dot{I}_{1.I} / n_{TA1} + \dot{I}_{1.II} / n_{TA2}$$

可见，在正常情况和外部故障时，纵差保护不动作；而在内部故障时，纵差保护动作。

值得指出的是：在正常运行情况下和外部故障时，差动回路中仍会流过一定的不平衡电流 \dot{I}_{bp} 。 \dot{I}_{bp} 越大，差动继电器的动作电流就越大，差动保护灵敏度就越低。因此，要提高变压器纵差保护的灵敏度，关键问题是减小或消除不平衡电流的影响。

§2 变压器纵差动保护的不平衡电流

变压器纵差保护的特点是形成不平衡电流的因素多，不平衡电流大，需要采取相应措施，以消除不平衡电流对纵差保护的影响：

一、励磁涌流

变压器的励磁电流只流过其电源侧，故它将形成不平衡电流反应到差动回路。正常运行时，变压器的励磁电流不超过不平衡电流的 2%~10%，在外部故障时，由于电压降低，励磁电流更小，因此，通常励磁电流对变压器纵差保护的影响可不予以考虑。但是，当变压器空载投入或外部故障切除，电压恢复时，励磁电流大大增加，其值可能达到变压器额定电流的 6~8 倍，该励磁电流称为励磁涌流。

这么大的励磁涌流作为不平衡电流反应到差动回路绝不允许忽视，由于励

磁涌流在数值上可与变压器内部故障时的短路电流相比拟，因此，在实现纵差保护时，如何保证它在出现励磁涌流时可靠不动作，而在内部故障时能可靠动作，这是必须解决的一个问题。

励磁涌流是由于变压器铁心中的磁通不能突变和铁心饱和所引起的。下面，以单相变为例来分析产生励磁涌流的物理过程。

当变压器外加交流电压时，变压器铁心中磁通的变化率应该与交流电压的瞬时值相对应。当电源电压为正弦电压，且忽略电源内阻抗及变压器漏电抗时，变压器空载合闸时的暂态过程可用下式表达：

$$d\phi/dt=U_m\sin(\omega t+\alpha)$$

式中： U_m —电源电压最大值；

α —空载合闸时电压初相角；

变压器空载合闸时，铁心中应立即建立与合闸瞬间电源电压相对应的周期分量磁通 Φ_{zq} ，即稳态磁通。与 Φ_{zq} 对应的励磁电流周期分量也相应产生， Φ_{zq} 与电源电压之间的相角差为 90° 。在变压器合闸前，铁心中总有剩余磁通。由于铁心中磁通不能突变，故在合闸瞬间，铁心中必然产生一非周期分量磁通，即暂态磁通，其起始值为 Φ_{fzq} 。合闸瞬间， $\Phi_z+\Phi_{zq}+\Phi_{fzq}=\Phi_{sh}$ ，保证铁心中磁通不突变。

如果刚好是在电压瞬时值为零（即 $\alpha=0^\circ$ ）时合闸，合闸瞬间稳态磁通刚好为最大值 Φ_m 并且为剩余磁通 Φ_{sh} 方向相反，即： $\Phi_{zq}=-\Phi_m$ ，则铁心中总磁通的 Φ_z 将最大，并且在半个周期时达到最大值 $\Phi_{\Sigma,m}=\Phi_{sh}+2\Phi_m$ 在最严重情况下， $\Phi_{sh}=\Phi_m$ ，则 $\Phi_{\Sigma,m}=3\Phi_m$ 。如果变压器铁心磁化特性是线性的，则励磁电流也不过正常励磁电流的3倍。但实际上磁化曲线是非线性的，从而形成很大的励磁涌流。

当 U_m 一定时， Φ_{zq} 的 Φ_m 一定， $\Phi_{\Sigma,m}$ 随 Φ_{fzq} 变化。图23-2为最严重情况，事实上 Φ_{Σ} 不总是最大。因为： 1° 空载合闸在 $\alpha=0^\circ$ 的可能性小，当 $\alpha=9^\circ$ 时，

则不会出现暂态过程； 2° Φ_{sh} 不一定与 Φ_{zq} 方向相反； 3° 如计及电源阻抗，电源电压总磁通也会减小。

与一不总磁通 Φ_m 相对应的励磁涌流 I 的波形，可用图 23-3 表示。

可见，励磁涌流波形主要有三个特点：

- 1、含有大量非周期分量，以致波形偏于时间轴一侧。
- 2、含有大量高次谐波，而以二次谐波为主。
- 3、波形不连续，具有间断角。

对于三相变压器，前面分析的结论仍然适用，励磁涌流具有以下特性：

- 1、具有很大的非周期分量。
- 2、含有显著的二次谐波分量。
- 3、波形有间断角。

防止出现励磁涌流时变压器纵差保护误动的办法：

- 1、采用差动速断保护
- 2、采用带速饱和变流器的差动继电器构成变压器差动保护
- 3、采用二次谐波制动原理构成变压器纵差保护。
- 4、根据鉴别波形间断角的原理构成变压器纵差保护。

二、因变压器各侧 CT 型号不同而产生的不平衡电流

因变压器各侧电压等级和额定电流不同，所以各侧所选用 CT 型号总不一样。若 CT 不同型， $K_{jx}=1$ ；若 CT 同型， $K_{jx}=0.5$ 。

三、因变压器两侧电流相位不同而产生的不平衡电流

电力变压器广泛采用 Y/ Δ -11 接线，即使两侧电流数值相等，由于相位不同而存在不平衡电流，为消除这种不平衡电流，应采用相位补偿接线；将变压器 Y 形侧的 CT 二次侧接成 Δ ，变压器 Δ 形侧的 CT 二次侧接成 Y。

应该指出的是：1、差动回路里是不会出现零序电流的；2、选择 CT 的变

比条件是： $\sqrt{3}n_{I\Delta}/n_{1Y}=n_b$ 。

四、因 CT 的标准变比和计算变比不同而产生的不平衡电流

变压器纵差保护实际上总是采用定型产品的 CT，其变比都是标准变比与计算变比往往不一样，以致在差动回路中出现不平衡电流，通常是采用自耦变流器或 CT 的平衡线圈予以补偿。还不能完全消除的不平衡电流应在整定计算中躲过，主要在整定计算中引入一个系数 Δf_{ph} 。

五、由于变压器调压抽头改变而引起的不平衡电流

$$I_{bp}=\Delta U I_{d.max}/n_1$$

根据以上分析，在外部短路时，变压器纵差保护回路中的可能最大不平衡电流为：

$$I_{bp.max}=(K_k K_{fzq} 10\% + \Delta U + \Delta f_{ph}) I_{d.max}/n_1$$

§ 3 作业

P₂₅₀ 6-3

授课次数：24

【教学内容】BCH—2型差动继电器及其构成的纵差保护。

【教学目的】通过教学，使学生掌握BCH—2型差动继电器的构成原理及其构成的纵差保护。

【教学重点】用BCH—2型差动继电器构成纵差保护的整定计算原则。

【教学难点】整定计算中的灵敏度校验。

【教学过程】

§0 复习回顾及提问

1. 变压器纵差保护的构成原理？
2. 影响变压器纵差保护不平衡电流的因素及其解决措施？

§1 BCH—2型继电器的构成原理

BCH—2型差动继电器的原理结构图如教材图所示。

差动线圈的磁势 $\dot{I}_{cd}W_{cd}$ 在 B 柱中产生的磁通为 Φ_{cd} ，该磁通由 B 柱流出

后分为 $\Phi_{cd, BA}$ 和 $\Phi_{cd, BC}$ 两部分，分别经A柱和C柱形成闭合回路。

$$\Phi_{cd} = \Phi_{cd, BA} + \Phi_{cd, BC}$$

该 R_A, R_B, R_C 分别表示A.B.C三个心柱及相应磁路磁阻，则

$$\begin{aligned} \Phi_{cd} &= \dot{I}_{cd} W_{cd} / [R_B + R_A / R_C] \\ &= \dot{I}_{cd} W_{cd} (R_C + R_A) / (R_A R_B + R_B R_C + R_C R_A) \end{aligned}$$

设计继电器时，取铁心不饱情况下 $R_A = R_C = 2 R_B$ ，因此

$$\begin{aligned} \Phi_{cd} &= \dot{I}_{cd} W_{cd} / (R_B + 0.5 R_A) = \dot{I}_{cd} W_{cd} / 2 R_B \\ \Phi_{cd, BA} &= \Phi_{cd, BC} = 1/2 \Phi_{cd} = \dot{I}_{cd} W_{cd} / 4 R_B \end{aligned}$$

Φ_{cd} 通过 W'_d 及 $\Phi_{cd, BA}$ 通过 W''_d 时分别在短路线圈的两部分感应出电动势，并由此电流 \dot{I}_d 在 W'_d 和 W''_d 环流。 $\dot{I}_d W'_d$ 产生磁通 Φ'_d 其方向与 Φ_{cd} 相反，同上分析，铁心不饱和时

$$\Phi'_d = \dot{I}_d W_d (R_C + R_A) / (R_A R_B + R_B R_C + R_C R_A) = \dot{I}'_d W'_d / 2 R_B$$

$$\Phi'_{d, BA} = \Phi'_{d, BC} = 1/2 \Phi'_d = \dot{I}'_d W'_d$$

$\dot{I}_d W''_d$ 在A柱产生 Φ''_d ， Φ''_d 方向与 $\Phi'_{d, BA}$ 相同，其值为

$$\Phi''_d = \dot{I}_d W''_d / [R_A + R_B / R_C] = \dot{I}_d W''_d / (8/3 R_B)$$

Φ''_d 分配于B柱和C柱中，即

$$\Phi''_{d, AB} = \Phi''_d R_C / (R_C + R_B) = \dot{I}_d W''_d / 4 R_B$$

$$\Phi''_{d, AC} = \Phi''_d R_B / (R_C + R_B) = \dot{I}_d W''_d / 8 R_B$$

综合以上分析结果，可得各心柱中的合成磁通分别为

$$\Phi_A = \Phi_{cd, BA} - \Phi'_{d, BA} - \Phi''_d$$

$$\Phi_B = \Phi_{cd} - \Phi'_d - \Phi''_{d, AB}$$

$$\Phi_C = \Phi_{cd} - \Phi'_{d, BC} + \Phi''_{d, AC}$$

继电器的动作条件取决于 Φ_{cd} ， Φ'_d 和 Φ''_d 三个磁通的相互关系，也就是受短路线圈的影响，可分析如下：

- 1、短路线圈开路 ($I_d = 0$) 时，在铁心中只有 \dot{I}_{cd} 作用，这是普通速饱和变

流器的情况。

2、短路线圈闭合时，出现了去磁磁通 $\Phi'_{d, BC}$ 和助磁磁通 $\Phi''_{d, AC}$ ，如果保持 $W''_d=2W'_d$ ，短路线圈不起作用；如果减小 W''_d/W'_d 的值，即单独增大 W'_d 的匝数，去磁作用增大，此时为使继电器动作，必须增大通入继电器的电流。

3、短路线圈对直流分量电流的作用：若 W_{cd} 中通入含直流分量的电流，直流分量电流将使铁心饱和， W_2 中的感应电势减小，而短路线圈将使 W_2 中的感应电势进一步减小，从而加强了躲开非周期分量的能力，并亦是BCH—2型继电器“加强型”名称的由来。同时，保持 $W''_d=2W'$ ，而增加 W''_d 和 $2W'$ 的匝数，继电器躲开非周期分量的能力增强。短路线圈的这个作用，用直流助磁特性 $\varepsilon=f(k)$ 表示（ ε 为相对动作电流， k 为偏移系数），并有

$$\varepsilon=I_{dz}/I_{dz.0} \quad k=I_{zl}/I_{dz}$$

§ 2 由BCH—2型继电器构成的纵差保护

一、保护的接线

教材图示出了由BCH—2型继电器构成的双卷变压器纵差保护的单相接线

图。值得注意的是：实际接线中的端子①③⑤⑥⑦。

二、保护的整定计算原则

1、选择CT实际变比，变压器各侧CT的实际二次电流应按实际变比折算，从而取二次电流大的一侧为基本侧。

2、计算变压器两侧外部短路时的最大短路电流，并归算至基本侧。

3、按以下条件计算，取其最大者为保护动作电流计算值。

1⁰ 躲过变压器空载投入或切除短路后电压恢复时的励磁涌流，按下式计算：

$$I_{dz.jb} = K_k I_{e.B}$$

式中： K_k 取 1.3

2⁰ 躲过电流互感器二次回路断线,按下式计算

$$I_{dz.jb} = K_k I_{fh.max}$$

式中： K_k 取 1.3

$I_{fh.max}$ —正常运行时，变压器的最大负荷电流；当最大负荷电流不能确定时，可用变压器的额定电流 $I_{e.B}$ 。

3⁰ 躲过外部短路时的最大不平衡电流，按下式计算：

$$I_{dz.jb} = K_k I_{bp.max} = K_k (K_{tx} K_{fzq} 10\% + \Delta U + \Delta f_{zq}) I_{d.max}^{(3)}$$

式中： K_k —可靠系数，取为 1.3。

K_{fzq} —考虑短路电流非周期分量影响的系数，采用 BCH-1 或 BCH-2 型 CT 时取 1。

K_{tx} —同型系数，当 CT 同型时，取 0.5；当不同型时，取为 1。

ΔU —变压器调压引起的相对误差，一般取调压范围的一半。

Δf_{zq} —由继电器平衡线圈整定匝数与计算匝数不等而产生的相对误差，初算时取 0.05。

4、计算继电器动作电流，确定基本侧工作线圈匝数。

$$I_{dz.jb.js} = K_{jx} I_{dz.jb} / n_{L.jb}$$

式中： $n_{L.jb}$ —基本侧 CT 变比。

K_{jx} —CT 接线系数，CT 接在 Y 形时为 1，接成 Δ 时为 $\sqrt{3}$ 。基本侧的工作线圈的计算匝数为

$$W_{g.jb.js} = AW_0 / I_{dz.jb.js}$$

式中： AW_0 为继电器的动作磁势，如无实测值，可取为 60 安匝。

确定基本侧继电器的工作线圈匝数为：

$$W_{g..jb.z} = W_{cd.z} + W_{ph.l.z}$$

式中： $W_{cd.z}$ 、 $W_{ph.l.z}$ 为基本侧整定值； $W_{g.jb.z}$ 选取应小于且接近于 $W_{g.jb.js}$ ，即为 $W_{g.jb.js}$ 的取整值。

继电器实际二次动作电流：

$$I_{dz.jb.j} = AW_0 / W_{g.z}$$

保护的的实际一次动作电流：

$$I_{dz.jb} = I_{dz.jb.j} n_{L.jb} / K_{jx}$$

5、确实非基本侧继电器平衡线圈匝数。非基本侧继电器平衡线圈匝数计算值为：

$$W_{ph.fj.js} = W_{g.jb.z} I_{l.e.2} / I_{l.e.2} - W_{cd.z}$$

对 $W_{ph.fj.js}$ 进行四舍五入取整后得到非基本侧平衡线圈的整定值 $W_{ph.fj.z}$ 。

6、由于继电器平衡线圈匝数整定值与计算值不等引起的相对误差为

$$\Delta f_{zq} = (W_{ph.fj.js} - W_{ph.fj.z}) / (W_{ph.fj.js} + W_{cd.z})$$

若 $|\Delta f_{zq}| \leq 0.05$ ，则计算有效；若 $|\Delta f_{zq}| \geq 0.05$ ，则需将此值代入动作电流整定条件 3 重新计算。当重新计算后得到的动作值比原计算动作值大时，必须从第 4 步开始重新做。

7、确定继电器短路线圈的抽头

对于中、小型变压器，一般选 C_1-C_2 或 D_1-D_2 ；对于大容量变压器，一般选项用 B_2-B_1 或 A_2-A_1 。

8、灵敏系数校验

$$K_{lm} = I_{d.min} / I_{dz.jb} \geq 2$$

或
$$K_{lm} = W_{g.jb.z} K_{jx.jb} I_{d.min} / n_{l.jb} AW_0 \geq 2$$

式中： $I_{d.min}$ —保护范围内短路时，归算到基本侧总的的最小短路电流；

$K_{jx.jb}$ —基本侧电流互感器的接线系数，见表 24-1 所示；

I_{dz} —保护装置基本侧的动作电流，用实际整定值；

$W_{g.jb.z}$ —继电器基本侧工作线圈的整定匝数。

表 24-1 三相及二相短路时保护的接线系数

注：本表适用于三相式继电器接线。

序号	故障地点	短路类型	$K_{jx.Y}$	$K_{jx.\Delta}$	$K_{Im}^{(2)}/K_{Im}^{(3)}$
1	Y 侧	三相	$\sqrt{3}$	1	/
2	Δ 侧	三相	$\sqrt{3}$	1	/
3	Y 侧	二相	2	$2/\sqrt{3}$	1
4	Δ 侧	二相	$\sqrt{3}$	1	$\sqrt{3}/2$

授课
次数：
25
【教

学内容】由 BCH—2 型差动继电器构成的纵差保护整定计算实例及习题课。

【教学目的】通过例题讲解，使学生掌握纵差保护的整定计算方法。

【教学重点】纵差保护整定计算方法。

【教学难点】计算公式中各符号的实际含义。

【教学过程】

§ 0 复习回顾及提问

1. BCH—2 型差动继电器的构成原理？
2. 由 BCH—2 型差动继电器构成的纵差保护整定计算步骤？

§ 1 整定计算实例

计算用示意图 25-1。

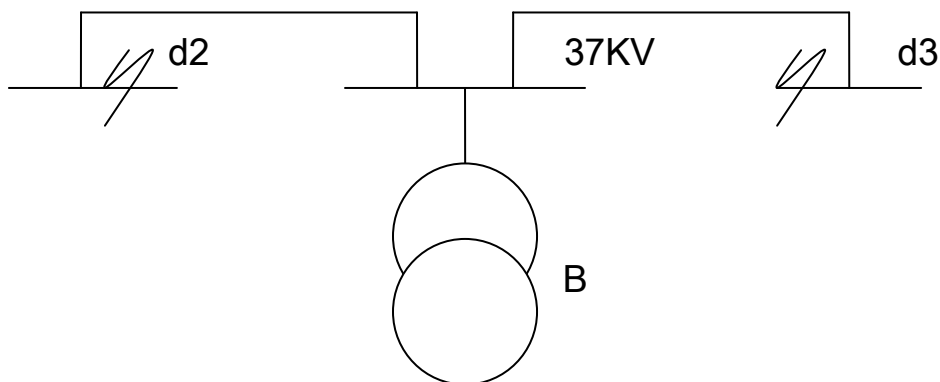
已知下列数据：

变压器型号：SJL₁-6300/35，38.5±5%/6.3KV,6300KVA，Y，d-11 接线。

CT 变比：6.3KV 侧为 800/5A；35KV 侧为 200/5A。

表 25-1 短路电流计算成果表

短路点	三相短路电流最大运行方式	三相短路电流最小运行方式	保护安装处残(标么值)	备注
35KV 母线 (d2)	$I''(35)=326$			仅流经保护的电流
6.3KV 母线 (d1)		$I''(35)=326$	$U_2=0.33$	最小运行方式
35KV 线路末端(d3)		$I_{\infty}(6.3)=1041$	$U_1=0.37$	最大运行方式



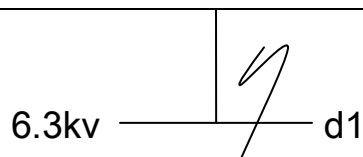


图 25-1

试整定变压器 B 的纵差保护。

解：1、根据已知条件，计算出表 25-2 中的数据

表 25-2 计算用的额定数据表

计算数据名称	各侧数据	
额定电压 $U_{e.B}(KV)$	38.5	6.3
额定电流 $I_{e.B}(A)$	$6300/(\sqrt{3}\times 38.5)=94.5$	$6300/(\sqrt{3}\times 6.3)=577$
电流互感器变比 n	$200/5=40$	$800/5=160$
CT 接线方式	Δ	Y
二次侧额定电流 $I_{e.B2}(A)$	$3\times 94.5/40=4.09$	$577/160=3.61$

选取 38.5KV 侧为基本侧。

2、继电器动作电流的计算

1) 按躲过励磁涌流整定，即：

$$I_{dz.jb}=K_k I_{e.B}=1.3\times 94.5=123(A)$$

2) 按躲过 CT 二次回路断线整定，即：

$$I_{dz.jb}=K_k I_{e.B}=1.3\times 94.5=123(A)$$

3) 按躲过外部短路最大不平衡电流整定，即：

$$\begin{aligned} I_{dz.jb} &= K_k I_{bp.max} = K_k (K_{tx} K_{fzq} 10\% + \Delta U + \Delta f_{zq}) I_{d.max} \\ &= 1.3 (1\times 1\times 0.1\times 0.05 + 0.05) \times 337 = 87.6 (A) \end{aligned}$$

取 $I_{dz.jb}=123 (A)$ 。

故 $I_{dz.jb.j.js}=K_{jx} I_{dz.jb}/n_1=\sqrt{3}\times 123/40=5.33 (A)$

3、继电器工作线圈匝数计算

$$W_{g.jb.js}=AW_O/I_{dz.jb.j.js}=60/5.33=11.26 (匝)$$

取 $W_{g.jb.z}=11$ 匝， $W_{cd.z}=10$ 匝， $W_{ph.1.z}=1$ 匝。

4、继电器非基本侧平衡线圈匝数计算：

$$W_{ph.fj.js}=W_{g.jb.z}I_{l.e.2}/I_{l.e.2}-W_{cd.z}=11\times 4.09/3.61-10=2.46 \text{ 匝}$$

取 $W_{ph.fj.z}=2$ 匝

5、校验

$$\begin{aligned}\Delta f_{zq} &= (W_{ph.fj.js}-W_{ph.fj.z})/(W_{ph.fj.js}+W_{cd.z}) \\ &= (2.46-2)/(2.46+10)=0.037\end{aligned}$$

Δf_{zq} 的绝对值小于 0.05，符合要求。

6、短路线圈确定

选用 C_1-C_2 抽头。

7、灵敏度校验

$$\begin{aligned}K_{lm} &= W_{g.jb.z}K_{jx.jb}I_{d.min}/n_{l.jb}AW_o \\ &= \sqrt{3}\times 326\times 11/40\times 60=2.59>2 \quad \text{满足要求。}\end{aligned}$$

§ 2 作业

教材 P₂₅₀ 6-6

授课课次：26

【教学内容】 变压器相间短路的后备保护及变压器的过负荷保护。

【教学目的】 通过教学，使学生掌握变压器相间短路后备保护的原理及整定计算。

【教学重点】 各种相间短路的后备保护配置原则，整定计算及原理接线图的

识图。

【教学难点】保护的配置原则及原理图的识读。

【教学过程】

§ 0 复习回顾及提问

简述由 BCH—2 型差动继电器构成的变压器纵差保护的整定计算步骤。

§ 1 变压器相间短路的后备保护

变压器相间短路的后备保护既是变压器本身相间短路的近后备保护，又是相邻母线或线路的远后备保护。根据变压器容量的大小和系统短路电流的大小，变压器相间短路的后备保护可采用过电流保护、低电压起动的过电流保护、复合电压起动的过电流保护或负序电流保护等。

一、过电流保护

1、配置原则

过电流保护宜用于降压变压器。在大接地电流电网中用三相式接线；在小接地电流电网中用两相式接线。为了提高 Y/Δ 型变压器低压侧两相短路的灵敏度可采用两相三继电器式接线。

2、原理接线图

参见教材 P₁₉₀ 图 9-26

3、保护整定计算

1) 动作电流 I_{op} 按躲开变压器的最大负荷的最大负荷电流 $I_{L,max}$ 整定，即：

$$I_{op} = K_{rel} I_{L,max} / K_{re}$$

式中： K_{rel} —可靠系数，一般取为 1.2 ~ 1.3；

K_{re} —返回系数，取为 0.85；

关于最大负荷电流 $I_{L,max}$ 确定原则。

1、对并联运行的变压器，应考虑切除一台变压器后的负荷电流。当各台变压器的容量相同时，可按下式计算：

$$I_{L,max}=nI_{N,T}/(n-1)$$

式中：n—并联运行变压器的最少台数；

$I_{N,T}$ ——每台变压器的额定电流；

2、对降压变压器，应考虑负荷中电动机自启动时的最大电流，即：

$$I_{L,max}=K_{ss}I_{N,T}$$

式中： K_{ss} —自启动系数，其值与负荷性质及用户与电源间的电气距离有关，对 110KV 降压变电站的 6-10KV 侧， $K_{ss}=1.5-2.5$ ；35KV 侧， $K_{ss}=1.5-2.0$ 。

2) 动作时限应比相邻元件保护的最大动作时限大一个时限级差 Δt 。

3) 灵敏度校验

$$K_{sen}=I^{(2)}_{k,min}/I_{op}$$

式中： $I^{(2)}_{k,min}$ —被校验点最小两相短路电流。

1、作近后备时，取变压器低太侧母线为校验点，要求 $K_{sen}\geq 1.5-2.0$ 。

2、作远后备时，取相邻线路末端为校验点，要求 $K_{sen}\geq 1.2$ 。灵敏度 K_{sen} 不够时，可改用其它后备保护。

二、低电压起动的过电流保护

1、配置原则

当过电流保护灵敏度不满足要求时，可采用该保护。

2、整定计算

1) 动作电流按躲开变压器的额定电流整定，即：

$$I_{op}=K_{rel}I_{L,max}/K_{re}$$

2) 动作电压按躲过正常运行时最低工作电流。即：

$$U_{op}=0.7U_{N,T}$$

3) 动作时限比相邻元件保护的最大动作时限大一时间级差 Δt 。

4) 灵敏度校验

1、电流元件的校验同过电流保护。

2、电压元件灵敏度校验

$$K_{sen}=U_{op}/U_{k.max}$$

式中： $U_{k.max}$ —最大运行方式下，灵敏系数校验点短路时，保护安装处的最大电压。

K_{sen} 要求值同电流元件。

3、原理接线图

参见教材 P₁₉₀ 图 9-27。

KM 作用：当 PT 二次回路断线时，低电压继电器动作，起动 KM，发出 TV 断线信号。

三、复合电压起动的过电流保护

1、配置原则

复合电压（包括负序电压及相间电压）起动的过电流保护宜用于升压变压器，系统联络变压器和过电流，低压过电流保护不满足灵敏度要求的降压变压器。

2、整定计算

1) 电流元件整定同低压过电流保护。

2) 低电压继电器的一动作电压 U_{op} ，对于降压变压器，按正常运行最低工作电压 $U_{g.max}$ 来整定。

$$U_{op}=U_{g.min}/K_{rel}K_{re}$$

式中： $U_{g.min}=0.9U_N$, $K_{rel}=1.2$; $K_{re}=1.15$.对于升压变压器，一般取

$$U_{op}= (0.5-0.6) U_{No}$$

3) 负序电压继电器动作电压按躲过正常运行时的最大不平衡电压整定，根据运行经验及试验结果，可取为

$$U_{op}=0.06U_{N.T}$$

4)动作时限按相邻元件中保护时取最长者加一个 Δt 。

5) 灵敏系数校验

- 1、电流元件与过电流保护相同。
- 2、低电压元件与低压过电流保护相同。
- 3、负序电压元件

$$K_{sen}=U_{k.min.2}/U_{op.2}\geq 1.2$$

式中： $U_{k.min.2}$ —后备保护范围末端金属性不对称短路时保护安装处最小负序电压。

3、原理接线图

参见教材 P₁₉₁ 图 9-28 所示。

强调两相短路与三相短路保护动作情况的区别。

四、负序电流及单相式低压起动的过电流保护

1、配置原则

当复合电压过电流保护灵敏度不满足要求时可采用该保护，通常用于 63MVA 及以上升压变压器的保护。

2、整定计算

1) 负序电流保护的動作电流按以下条件选择

①躲开变压器正常运行时负序电流滤过器 FLG 输出的最大不平衡电流其值一般为 $(0.1-0.2) I_{N.T}$;

②躲过线路一相断线时出现的负序电流；

③与相邻元件的负序电流保护在灵敏系数上的配合。

2) 灵敏系数校验

$$K_{sen}=I_{k.2.min}/I_{op.2}\geq 2$$

式中： $I_{k.2.min}$ —远后备保护范围末端不对称短路时，流过保护的最小负

序电流。

3、原理接线图

参见教材 P₁₉₂ 图 9-29 所示。

五、三绕组变压器后备保护的配置原则。

(一) 对双绕组变压器

相间短路后备保护应装于主电源侧。根据主电路情况，可带一段或两段时限。若为两段时限，较小的时限用于缩小故障影响范围。较长的时限用于断开变压器各侧断路器。

(二) 对于三卷变压器

1、对单侧电源的三卷变，应装两套后备保护，分别装于电源侧和负荷侧。负荷侧 t_{II} 按比该侧母线所连接的元件保护的**最大动作时限大一个时限级差 Δt ；电源侧保护带两级时限，以较小 $t_{III} (=t_{II}+\Delta t)$ 跳开变压器第三侧断路器，以较长时限 $t_I (=t_{III}+\Delta t)$ 跳各侧断路器。

2、对多侧电源的三卷变，应在三侧都装设后备保护，对动作时限最小的保护，应加装方向元件，动作功率方向取为由变压器指向母线。各侧保护均跳本侧断路器，在装有方向元件的一侧，增设一套无方向的后备保护，其时限应比三侧保护时限最长的大一个时限级差 Δt ，跳三侧断路器。

§ 2 过负荷保护

变压器的过负荷保护反应变压器对称过负荷引起的过电流。保护用一个电流继电器接于一相电流，经延时动作于信号。

一、保护配置位置

参见教材 P₁₉₃。

二、保护整定计算

$$I_{op}=K_{rel}I_{N.T}/K_{re}$$

式中： $K_{rel}=1.05$, $K_{re}=0.85$, $t=t_{s,d}+(1-2) \Delta t$

$t_{s,d}$ —变压器后备保护中动作时限最长者。

§ 3 作业

教材 P₂₅₀ 6-5

授课课次：27

【教学内容】 变压器接地短路的后备保护。

【教学目的】通过教学，使学生掌握变压器接地短路保护的原理及整定计算。

【教学重点】中性点直接接地变压器、中性点可能接地或不接地变压器接地短路后备保护的实现。

【教学难点】分级绝缘变压器接地短路后备保护的实现。

【教学过程】

§0 复习回顾及提问

1. 变压器相间短路后备保护的作用？

2. 对于降压变压器，过电流保护装于什么侧？对于升压变压器，过电流保护又装于什么侧？

3. 复合电压的概念？

4. 复合电压启动的过电流保护的動作过程分析？

5. 对于三卷变压器，如何决定装设多少套相间短路的后备保护呢？

§1 概述

在 110KV 及以上中性点直接接地电网中，接地短路是觉的故障形式，因此，中性点直接接地电网中的变压器要装设零序保护，用它来反应变压器高压侧绕组，引出线和变电站母线上的接地短路，作为变压器主保护的后备保护及相邻元件接地保护的后备保护。

电网中发生接地短路时，零序电流的大小及分布与电网中变压器中性点接地数目和位置有密切关系。通常，对有一台升压变压器的变电站，变压器中性点直接接地运行；对两台以上变压器并列在高压母线运行的变电站，则采用一部分变压器接地运行另一部分变压器中性点不接地运行的方式，以使电网在各种运行方式下变压器中性点接地数目及位置尽量维持不变。

变压器中性点是否直接接地运行还与变压器的绝缘水平有关，220KV 及以上的大型变压器，高压绕组分级绝缘，其中性点绝缘水平有两种类型：1、

绝缘水平较低，中性点必须接地运行；2、绝缘水平较高，中性点可接地运行，亦可不接地运行。

§2 中性点直接接地变压器的零序电流保护

中性点直接接地运行变压器应装设零序电流保护参见教材 P₁₉₄ 图 9-13。

一、保护构成

保护用 CT 装于中性点引出线上，其额定电压可选低一级，变比根据接地短路电流引起的热稳定和电动力稳定条件来决定。

二、保护的整定

1、动作电流按与被保护侧母线引出线零序保护后备在灵敏系数上配合的条件整定，即：

$$I_{dz} = K_{ph} K_{fz} I_{dz.o.l}$$

式中： $I_{dz.o.l}$ -引出线零序电流保护后备段的动作电流。

K_{ph} -配合系数，取 1.1 ~ 1.2。

K_{fz} -分支系数，其值等于引出线零序电流保护后备段保护范围短路时，流过本保护的零序电流与流过引出线的之比。

2、动作时限

1) 零序 I 段： 1^0 以较短延时(0.5S)作用于跳母联或分段开关；

2^0 以较长延时(0.5S+ Δt)作用于跳开变压器各侧断路器。

2) 零序 II 段： 1^0 第一级延时与引出线零序后备段动作延时配合；

2^0 第二级延时比第一级延时长一个阶梯时限 Δt 。

3、保护的灵敏参数按后备保护范围末端接地短路校验，要求 K_{lm} 不小于 1.2。

§3 中性点可能接地运行或不接地运行变压器的后备保护

一、分段绝缘变压器

(一)中性点未装设放电间隙时

对于这种情况，为了防止中性点绝缘在工频过电压作用下损坏，不允许在无接地中性点的情况下带接地故障点运行。

因此，当发生接地故障时，应先切除中性点不接地的变压器，然后切除中性点接地的变压器。

1. 保护单相原理接线参见教材 P₁₉₅ 图 9-32，下面分三种情况来分析该保护的動作情况：

1⁰ 正常运行时，保护不会动作。

2⁰ 变压器的中性点接地运行情况下，系统发生接地故障时， $3\dot{I}_0 \rightarrow LJ_0$ ， LJ_0 动合触点起动 1SJ，1SJ 无延时动合触点闭合跳中性点不接地运行变压器，1SJ 延时动合触点闭合跳本变压器。

3⁰ 变压器的中性点不接地运行情况下，系统发生接地故障时， $3\dot{U}_0 \rightarrow YJ_0$ 动合触点闭合，起动 2SJ，2SJ 延时动合触点闭合跳本变压器。

4⁰ 注意：该保护装置有时可能无选择性。

2. 保护单相原理接线参见教材 P₁₉₆ 图 9-34。

1⁰ 保护的原理说明

保护带三级延时 t_1 、 t_2 、 t_3 ，延时 t_1 最小，作用于跳分段开关或母联开关； $t_2 > t_3$ ，作用于跳中性点不接地变压器； $t_3 > t_2$ ，作用于跳开中性点接地的变压器。保护動作情况分析：

1) 对于中性点接地的变压器；

2) 对于中性点不接地的变压器；

2⁰ 保护的整定

1) 動作值

i: 零序电压元件的動作电压按躲开正常运行时的最大不平衡电压整定，不

平衡电压可由实测得出，若无实测值，可取二次动作电压为 5V。

ii：零序电流元件的动作电流，除按前式计算外，尚需与中性点不接地变压器的零序电压元件在灵敏参数上的配合，以保证先切除中性点不接地的变压器。因此，零序电流元件的起动电流为

$$I_{dz.0} = K_{ph} 3I_0$$

式中： $3I_0$ -零序电压元件处于动作边界时，流过被保护变压器的零序电流，按 $3I_0 = U_{dz.0} / X_{O.B}$ 计算， $U_{dz.0}$ 为零序电压元件的起动电压， $X_{O.B}$ 为零序电抗；

K_{ph} -配合系数，取为 1.1。

2) 动作时限

t_1 应大于相邻线路的零序电流保护后备段的最动作时限，即

$$t_1 = t_{0.l.max} + \Delta t, t_2 = t_1 + \Delta t, t_3 = t_2 + \Delta t。$$

二、中性点装设放电间隙

保护单相原理接线参见教材 P₁₉₇ 图 9-35

与前面所学知识不同的是增设了瞬时动作于跳变压器的零序电流元件 $3I_0''$ 和零序电压元件 $3U_0''$ 。

保护动作情况分析：如果系统发生接地故障，且失去接地中性点，则中性点不接地变压器的中性点将出现工频过电压，放电间隙击穿放电，放电电流使零序电流元件 $3I_0''$ 起动，经或门 H，瞬时跳开 1DL，将故障变压器切除，从而保护了变压器中性点的绝缘。

$3I_0''$ 的动作电流根据间隙放电电流的经验数据整定，一般取其一次动作电流为 100A。

$3U_0''$ 的动作电压应低于变压器中性点绝缘的耐压水平，且在系统发生单相接地而未失去接地中性点时， $3U_0''$ 应可靠不动作。可以取 $3U_0''$ 的动作电

压 $U_{dz.0} = 180 \sim 236V$ ，通常取下限值 180V。

二、全绝缘变压器

保护单相原理接线参见教材 P₁₉₇ 图 9-36。

零序电压元件的动作值应躲开部分中性点接地系统中发生接地短路时，保护安装处可能出现的最大零序电压，一般可取 $U_{dz.0} = 180V$ 。

动作时限为躲开电网单相接地短路时暂态过程的影响，保护通常带 0.3 ~ 0.5S 延时。

§4 作业

补充习题

简述变压器接地短路保护的配置原则。

授课课次：28

【教学内容】 同步发电机保护概述；发电机纵联差动保护。

【教学目的】 通过教学，使学生掌握发电机的保护种类及作用。

【教学重点】 同步发电机的故障、不正常工作状态及继电保护的设置原则；发电机纵差保护的整定、构成。

【教学难点】 发电机纵差保护的配置及整定计算。

【教学过程】

项目七 发电机的保护

同步发电机是电力系统中十分重要而昂贵的电力设备，它的安全运行对保证电力系统的正常工作和电能质量起着决定性作用。然而，发电机是长期旋转运行的电机，其定子与转子回路都可能发生各种故障或异常运行状态，必须装设相应的性能完善的继电保护装置。

一、发电机可能发生的故障

1、定子绕组相间短路是危及发电机最严重的一种故障。短路点有很大的短路电流，其所产生的电弧不但会烧坏绝缘，还可能损坏铁芯，甚至引起火灾，给发电机的修复工作带来很在困难。

2、定子绕组单相匝间短路在匝间电压作用下，产生环流，使该处温度升高，绝缘损坏，并可能转变为单相接地或相间短路故障。

3、定子绕组单相接地故障点处会有电流流过定子铁心，研究证明当故障点电流超过 5A 并持续一定时间时，故障点定子铁心可能熔化，发电机须进行大修，定子铁心须重新选压。

4、转子回路一点或两点接地转子回路发生一点接地故障时，由于没有电流通路，对发电机并无危害。但若不及时处理，就有可能导致两点接地故障，造成励磁回路短路，可能损坏转子绕组和铁心。

二、发电机可能出现的不正常运行状态

1、外部短路引起的定子绕组过电流

2、过负荷引起的过电流

3、定子绕组电流不对称

4、励磁电流急剧下降或消失

5、定子绕组过电压

6、发电机逆功率运行

三、发电机继电保护

针对上述各种故障和异常运行状态，在发电机上应装设以下继电保护。

1、对定子绕组及其引出线上的相间短路，应装设纵联差动保护。

2、对定子绕组的单相接地故障，应装设零序保护。当 $I_{c\Sigma} \geq 5A$ 时，保护动作于跳闸；当 $I_{c\Sigma} < 5A$ 时，保护作用于发信号。

3、对定子绕组的匝间短路，有条件的话装设横联差动保护。

4、对外部短路而引起的定子绕组过电流，一般应装设低电压或复合电压起动的过电流保护；对容量为 5 万 KW 及以上的发电机，应装设负序电流保护。

5、对由对称过负荷而引起的定子绕组过电流，应装设对称过负荷保护。

6、对发电机励磁回路的接地故障，在水轮发电机和大型汽轮发电机，应装设一点接地保护；在一般汽轮发电机，应装设两点接地保护。

7、对发电机的励磁消失，可装失磁保护。

8、对转子回路的过负荷，在容量 10 万 KW 及以上并采用半导体励磁的发电机，可装转子回路过负荷保护。

9、对于水轮发电机及某些大容量汽轮发电机定子绕组的过电压，应装设过电压保护。

10、对于大容量的汽轮发电机，可装设逆功率保护。

应该指出：反应内部故障的发电机保护装置动作于发电机断路器跳闸时，必须联跳灭磁开关；反应外部故障的发电机保护装置动作于发电机断路器跳闸时，可联跳灭磁开关。

四、小型水轮发电机继电保护配置原则：

1、对于容量 500 ~ 800KW 的发电机，可配置电流速断保护，过电流、过电压、失磁、过负荷保护，如果电流速断保护灵敏度不够时，可装纵差。

2、对于 1000~6000KW 发电机：可配置纵差、复合电压起动的过电流、过电压、失磁、过负荷、定子绕组单相接地、励磁回路一点接地及低电压(用于水轮发电机作调相运行)保护。

§2 发电机定子绕组的相间短路

发电机定子绕组不同地点发生相间短路时，由于定子绕组各点感应电势不同，短路回路阻抗也不同，所以短路电流大小就不一样。现以一台与系统未并列的发电机内部相间短路为例进行讨论。如图-1 所示：

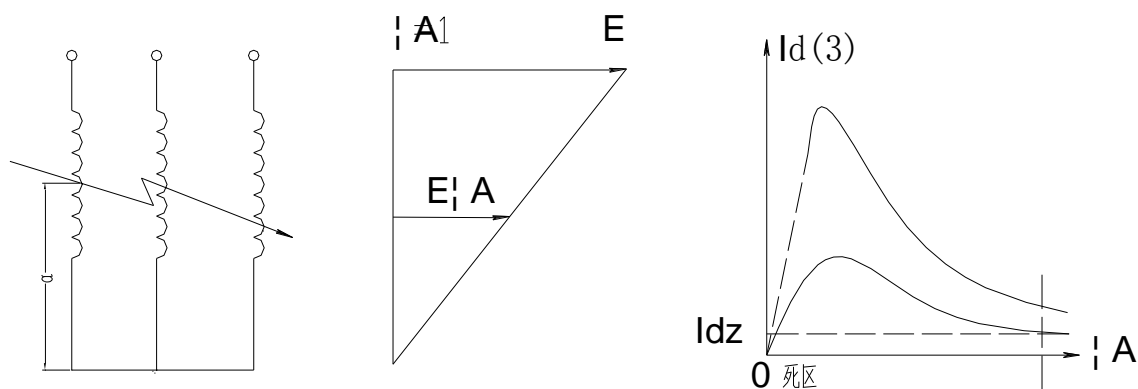


图 -1

设定子绕组三相短路故障点位于从中性点算起的短路匝数占总匝数的份额为 a 处。 $E_a = aE$ ，定子每相有效电阻为 R ，电抗为 X ，则短路回路中有效电阻为 $R_a = aR$ ，短路匝数的电抗近似为 $X_a = a^2X$ ，若短路点有过渡电阻 R_g 时， $I_{dz}^{(3)}$ 为

$$I_{dz}^{(3)} = \frac{\alpha E}{\sqrt{(R_g + \alpha R)^2 + (\alpha^2 X)^2}}$$

由上式可作出曲线 $I_{dz}^{(3)} = f(a)$ 。

可见， $R_g = 0$ 时，保护灵敏度足够 $R_g \neq 0$ ，保护有死区，为减少死区，提高保护灵敏度，必须设法降低动作电流。

§3 发电机纵联差动保护

一、发电机差动保护的构成

发电机纵联差动保护原理接线图参见教材 P₂₀₆ 图 10-1。

应该指出的是：

1、断线监视 KMD：防止 CT 二次侧断线后纵差保护误动，当 CT 二次侧断线时，KMD 动作于信号，运行人员将纵差保护退出工作。

KMD 动作电流 $I_{op.r}$ 应按躲过正常运行时的不平衡短路电流整定，据运行经验，其值一般为

$$I_{op.r}=0.2I_{GN}/n_{TA}$$

2、差动继电器 KD 的两种型式

1)采用 DL-31/10 型 KA 串联电阻构成的

这种保护的优点是设备简单，节省投资，便于调试及运行维护简单。缺点是躲过不平衡电流的能力差。

串联的附加电阻是用来限制短路电流非周期分量引起的暂态不平衡电流并加快其衰减，一般选用 1-10Ω。较大容量的发电机选用较大的电阻值，电阻值不应满足 CT 饱和电压的要求，即：

$$U_{dz} \geq 1.5I_{dz.j} \sqrt{(2R + R_F)^2 + X_j^2}$$

式中 U_{bh} - CT 的饱和电压，V；

$I_{dz.j}$ -继电器的动作电流，A；

R-保护装置电流回路一个臂的电阻，Ω；

R_F -附加电阻，Ω；

X_j -继电器线圈电抗，Ω；

2)采用 DCD-2 型 KD。

二、纵差保护整定计算

(一)采用高灵敏度接线方式的整定计算详见教材。

(二)采用一般接线方式的 DCD-2 型 KD 的整定计算

1、动作电流按下列两项条件计算，并选取最大者：

1)为避免保护装置在电流互感器二次回路断线时误动作，保护装置的动作电流应大于发电机的额定电流，即：

$$I_{op}=K_{rel}I_{G\cdot N}$$

式中 K_{rel} -可靠系数，取 1.3；

$I_{G\cdot N}$ -发电机额定电流。

2)大于外部短路时的最大不平衡电流，即

$$I_{op}=K_{rel}I_{unb\cdot max}=K_{rel}K_{unp}K_{ts}\times 10\%I_{k^{(3)}\cdot max}$$

式中 K_{rel} -取 1.3；

K_{unp} -对 DL 型 KA，取 1.5-2；对 DCD 型 KD 取 1；

$I_{k^{(3)}\cdot max}$ -发电机外部三相短路时，流经保护装置处的最暂态短路电流周期分量。

2、继电器动作电流

$$I_{op\cdot r}=K_{co}I_{op}/n_{ta}$$

式中 K_{co} -取 1。

3、DCD-2 型继电器动作安匝

$$W_{w\cdot cal}=AW_0/I_{op\cdot r}$$

取 $W_{w\cdot set}=W_{d\cdot set}+W_{b\cdot set}$

4、灵敏度校验

$$K_{sen}=K_{co}I_{k^{(2)}\cdot min}/I_{op}\geq 2$$

式中： $I_{k^{(2)}\cdot min}$ -发电机端两相短路时流经保护安装处的最小暂态短路电流周期分量。

§4、作业

P₂₈₂ 7-1 7-3

授课课次：29

【教学内容】 发电机纵差保护的整定计算；比率制动式发电机纵差保护；发

电机定子绕组匝间短路保护。

【教学目的】通过教学，使学生掌握发电机纵差保护的整定计算方法；掌握比率制动式发电机差动保护的工作原理。

【教学重点】用 BCH-2 型 CJ 构成的发电机纵差保护的整定计算；比率制动式

发电机纵差保护及发电机定子绕组匝间短路保护原理。

【教学难点】比率制动式发电机纵差保护，发电机定子绕组匝间短路保护原理。

【教学过程】项目七 发电机的保护

复习问题及提问

1. 发电机可能发生的故障和不正常工作状态有哪些？
2. 发电机可以装设的继电保护有哪些？
3. 发电机纵差保护的工作原理及整定计算步骤？

§1、发电机纵联差动保护

一、纵差保护整定计算

已知下列各值

发电机额定功率 $P_{e.f}=5000\text{kw}$;

发电机额定电压 $U_{e.f}=6300\text{v}$;

发电机额定功率因数 $\text{Cos}\varphi=0.8$;

发电机额定电流 $I_{e.f}=573\text{A}$;

发电机母线：三相短路时，发电机供给的暂态电流周期分量 $I_{d^{(3)}.max}=2600\text{A}$;

系统最小运行方式下，发电机母线三相短路时暂态短路电流周期分量

$I_{d^{(3)}.min}=2240A$;

系统最小运行方式下发电机母线三相短路时暂态短路电流升压变压器侧三相短路时，发电机供给的稳态短路电流周期分量 $I_{d^{(3)}.min}=1710A(6.3KV$ 侧) ;

系统最小运行方式下，升压变压器高压侧二相短路时，发电机母线处之最小负序电压 $U_{d^{(2)}.2.min}=3600V$;

系统最大运行方式下，升压变压器高压侧三相短路时，发电机母线处最大残压 $U_{cy^{(3)}.max}=1700v$;

电流互感器变比 $n_L=750/5=150$

电压互感器变比 $n_L=6000/100=60$

解：1、按以下两项条件整定一次动作值

1⁰ 按躲过电流互感器二次回路断线，即

$$I_{dz}=K_k I_{e-f}=1.3 \times 573=745(A)$$

2⁰ 按躲过外部短路时的最大不平衡电流，即

$$\begin{aligned} I_{dz} &= K_k K_{fzq} K_t \times 10\% I_{d^{(3)}.max} \\ &= 1.3 \times 1 \times 0.5 \times 0.1 \times 2600=169(A) \end{aligned}$$

选用 $I_{dz}=745A$ 。

2、继电器动作电流

$$I_{dz-j}=K_{jx} I_{dz}/n_L=1 \times 745/150=5(A)$$

3、BCH-2 型继电器工作匝数

4、灵敏度校验

$$K_{lm}=K_{jx} I_{d^{(2)}.min}/I_{dz}=1 \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times 2240/745=2.6 > 2$$

满足灵敏度要求。

二、比率制动式发电机差动保护

1、保护配置问题的提出

大型机组的次暂态电流 X_d'' 较大，且定子绕组采用水内冷的冷却方式，其中性点附近也可能发生相间短路，这就要求进一步减小发电机纵差保护的动作死区，相应地，保护动作电流应减小为 $0.2 \sim 0.6$ 倍发电机的额定电流，显然，采用 BCH-2 型继电器构成的纵差保护仍不能满足灵敏度要求，且可能延迟保护动作。于是，提出装设比率制动式发电机纵差动保护。

2、保护的构成及原理

1) 整流型比率制动式纵差保护的单相原理接线参见教材 P₂₀₉ 图 10-4

2) 工作原理：1⁰. 正常情况或外部短路时， $|E_1| < |E_2|$ ，保护不会动作；2⁰ 内部短路时， $|E_1| > |E_2|$ ，保护动作。

3) 切换电 QP 的作用：用以改变保护的動作电流，当 QP 接在右侧，保护动作电流为低值；QP 接在左侧，保护动作电流为高值。

4) 改变 2DKB 二次绕组转换开关 K 的位置，可以改变保护制动特性的制动参数。

3、保护的整定计算及灵敏系数校验

参见教材 P_{209~210}

§2、发电机定子绕组匝间短路保护

容量较大的发电机每相都有两个或两个以上并联支路。同一支路绕组间短路，或同相不同支路绕组匝间短路，都称为定子绕组的匝间短路。发生匝间短路时，纵差保护不能反应，故必须装设专用保护。

一、横差电流保护

1、保护设置条件

定子绕组的每一支路中性点侧都有引出端。

2、保护的构成及原理

保护原理接线参见教材 P₂₁₁ 图 10-6。

1)工作原理：1⁰ 正常运行或外部短路时，保护不会动作；

2⁰ 发生定子绕组匝间短路时，保护将动作。

该继电器由高次谐波(主要是 3 次谐波)滤过器 XLG 和执行元件 LJ 组成。XLG 用作滤去正常情况及外部短路时通过中性点连线不平衡电流中 3 次及其倍数谐波的分量。

3)切换片 QP 两个位置作用说明：

4)保护动作结果。

5)保护动作电流： $I_{dz}=(0.2 \sim 0.3)I_{ef}$

6)保护的评价：接线简单，动作可靠，同时能反应定子绕组分支开焊故障，该保护具有动作死区。

二、反零序电压的匝间短路保护

1、保护设置原理

发电机正常运行或相间短路或定子绕组单相接地时，不会出现零序电压，而当定子绕组出现匝间短路时，将出现零序电压，可以利用该零序电压来实现匝间短路保护。

2、保护的构成及工作原理

1)构成：参见教材 P₂₁₂ 图 10-8。

2)专用电压互感器 YH 说明。

3)电压继电器 YJ 的动作电压应大于正常运行或外部故障时 3 次谐波滤过器输出的最大不平衡电压。如果采用外部故障闭锁装置，动作电压只须躲过正常运行时的不平衡电压。

4)保护的评价：

三、反应转子回路 2 次谐波电流的匝间短路保护

1、保护设置原理

发电机定子绕组发出匝间短路时，定子绕组电流中有负序分量。负序分量电流建立的负序磁场，以同步转速沿被子旋转方向相反的方向旋转。因此，负序磁场在转子绕组中感应出 2 次谐波电势，转子回路中出现 2 次谐波电流。利用 2 次谐波电流可实现匝间短路保护。

2、保护的构成

参见教材 P₂₁₂ 图 10-9。

授课课次：30

【教学内容】发电机定子绕组单相接地保护;发电机励磁回路接地保护。

【教学目的】通过教学，使学生掌握发电机定子绕组单相接地和励磁回路接地保护的工作原理。

【教学重点】各种保护的工作原理。

【教学难点】双频 100%接地保护动作原理。

【教学过程】

§0 复习回顾及提问

1. 发电机纵差保护整定计算特点？
2. 发电机定子匝间短路保护的工作原理及各种保护的特点？

§1.发电机定子绕组单相接地保护

一、概述

为了安全，发电机外壳都是接地的。因此，其定子某相绕组绝缘损坏时发生的对外壳短路就是单相接地。

单相接地的危害，主要是故障点的电弧烧坏定子铁心，并进一步使之发生匝间短路或相间短路，因而发电机遭受更为严重的破坏。实践证明：发电机定子铁心烧伤程度与接地电流的大小故障持续的时间有关。

规程规定：当接地电流等于或大于 5A 时，应装设作用于跳闸的单相接地保护；当接地电流小于 5A 时，一般装设作用于信号的接地保护。

为保证大型发电机的安全，一般将大型发电机的中性点经消弧线川接地，使接地电流补偿到 1.5A 以下，接地保护作用于信号。

二、定子绕组单相接地的特点

1.单相接地时的零序电压

故障点离中性点越远，零序电压越高，机端接地时，零序电压等于相电压。

2.单相接地时的零序电流

发电机内部、外部单相接地时，流过机端零序电流互感器的零序电流是有区别的：外部接地时，流过的零序电流为发电机的零序电容电流；内部接地时，流过的电流为发电机电压各所有其它元件的零序电容电流之和。

三、反应零序电流的发电机定子绕组单相接地保护

1. 适应范围：通常用于并联在发电机电压母线上运行的发电机。

保护构成：

2. 参见教材 P₁₂₅ 图 10-12。

3. 保护工作原理：

1⁰ 定子绕组单相接地时动作。

2⁰ 外部单相接地及相间短路时不动作。

4. 保护整定

1⁰ 动作电流按躲开外部单相接地时流过零序电流互感器的零序电容电流和正常善下零序电流互感器二次侧出现的不平衡电流整定。

2⁰ 动作时限为 1 ~ 2S。

5. 在发电机断路器合闸前，保护不会起作用。可以利用接于开口三角形的电压表 V 通过 AN 来检查发电机是否存在接地故障。

四、反应零序电压的发电机定子绕组单相接地保护

1. 适用范围：发电机-变压器组。

2. 保护构成：工作原理：参见教不可教材 P₂₁₅ 图 10-13。

3. 保护的整定：

动作电压应躲开正常运行时开口三角形输出的 3 次谐波电压；同时要躲开在变压器高压侧接地时，通过变压器高，低压绕组间电容耦合到机端的零

序电压。

4. 解决死区的措施

1⁰ 降低动作电压值。

2⁰ 采用适当延时。

3⁰ 将定子绕组接地保护闭锁或使保护制动：变压器高压侧为非直接接地电网时，利用高压侧接地时的零序电压。

五、具有 100%保护范围的发电机定子绕组接地保护

(一)装设该保护的必要性

上述的反应零序电流和反应零序电压的单相接地保护都存在一定的死区，即保护不能反应定子绕组中性点附近的单相接地。对于大型发电机，特别是对于大型水内冷式机组，考虑到中性点附近定子绕组漏水，造成绝缘损坏的可能性大，要求保护无死区，因而要装设具有 100%保护范围的发电机定子绕组单相接地保护。

(二)双频式 100%接地保护

1. 保护工作原理

该保护由基波零序电压保护和 3 次谐波电压保护组成。基波零序电压保护定子绕组的 90%左右；3 次谐波电压保护反应定子绕组其余部分的接地故障。

2、3 次谐波电压保护原理：

1⁰ 正常运行时，中性点 3 次谐波电压总是大于机端 3 次谐波电压，保护不动作。

2⁰ 当 $a < 50\%$ 的范围内发生接地故障，机端 3 次谐波电压大于中性点 3 次谐波电压，保护动作。

3. 保护的构成

参见教材 P₂₁₇ 图 10-16。

(三)外加直流电源的 100%接地保护

1. 保护构成

参见教材 P₂₁₈ 图 10-17。

2. 保护工作原理：

1⁰ 正常运行时，保护不动作。

2⁰ 定子绕组单相接地时，保护动作。

3. 保护的评价。

§2 发电机励磁回路接一保护

发电机励磁回路一点接地是常见的故障。由于一点接地不会形成的接地电流的通路，励磁绕组一端接地时，其另一端对电压将升高为全部励磁电压，即比正常时增大一倍。此时，励磁绕组绝缘薄弱处，可能发生第二点接地。

励磁绕组发生两点接地时，部分励磁绕组被短接，使其铁心气隙磁通畸变，造成机组振动。故障点的电弧将烧伤转子绕组与铁心接地电流可能轴承和汽机磁化。故励磁回路两点接地的后果是严重的。

水轮发电机一般装设转子一点接地保护，并动作于信号。对于中小型汽轮发电机，装设绝缘检查装置，监视绕组绝缘。当发现其励磁回路有一点接地时，投入励磁回路两点接地保护，并动作于停机。对于大型汽轮发电机，宜采用动作于信号的转子一点接地保护和动作于停机的转子两点接地保护。

一、转子一点接地保护

(一)绝缘检查装置

实质上就是“电气”课上所介绍的直流绝缘监察装置。

(二)直流电桥式励磁回路一点接地保护

利用“转子偏心和磁路不对称等原因产生的转子转子绕组(选加在直流励

磁电压上)的交流电压,使转子绕组中点对地电压不保持为零,而是在一定范围内波动”原理构成的。

二、转子两点接地保护

(一)直流电桥原理构成的转子两点接地保护

原理参见教材 P₂₁₉ 图 10-20。

(二)反应定子绕组 2 次谐波电压的两点接地保护

原理分析参见教材 P₂₂₀。

§3 作业

教材 P₂₈₂ 7-5 7-7

授课课次：31

【教学内容】发电机的失磁保护；发电机定子绕组相间短路的后备保护与反时限负序电流保护；发电机定子绕组过电压保护；发电机定子绕组过负荷保护。

【教学目的】通过教学，使学生掌握发电机失磁保护、定子绕组相间短路后备保护、定子绕组过电压保护和过负荷保护的作用及工作原理。

【教学重点】发电机的磁运行及其影响、小型水电机失磁保护的构成；发电机后备保护的整定计算原则；过电压保护的设置理由。

【教学难点】小型水电站失磁保护的原理识图。

【教学过程】

§0、复习回顾及提问

1. 发电机定子绕组单相接地保护的作用及各种保护的特点？
2. 发电机励磁回路接地保护的作用及各种保护的特点？

§1、发电机的失磁保护

一、发电机失磁的原因

发电机失磁是指正常运行发电机的励磁线圈突然失去励磁电流或励磁电流下降到低于静态稳定所对应的励磁电流值的状态。发电机失磁的原因有：

- 1、励磁供电电源故障，如励磁机或励磁电源变压器故障；
- 2、励磁回路开路，如发电机励磁线圈开路或失磁开关误跳闸等；

- 3、发电机励磁线圈长期发热导致绝缘老化或损坏引起短路；
- 4、自动调节励磁装置故障，如可控硅元件损坏等；
- 5、值班人员误操作。

二、发电机失磁产生的影响及失磁保护

(一)发电机失磁后，对系统的影响是：

1、失磁发电机从系统中吸收无功功率，引起系统电压下降。若系统中无功储备不足，可能导致系统因电压崩溃而瓦解。

2、由于系统电压下降，系统中其它发电机在自动调节励磁装置的作用下将增加无功输出而导致过电流。若后备保护误动，就使故障波及范围扩大。

3、发电机有功功率的摆动以及系统电压的下降，可能导致相邻的正常运行的发电机与系统之间或系统各部分之间失步。

(二)对失磁的发电机来说，失磁产生不利影响是：

1、转子回路中出现差频电流而使转子附加发热，流过转子表层的差频电流还可能转子槽楔，护环的接触产生严重的局部过热，甚至灼伤。

2、失磁发电机异步运行后，其等效电抗降低，从系统中吸引的无功功率增加，重负荷下失磁，定子因过流导致过热。

3、发电机在重负荷下失磁后，其电磁转矩及有功功率要发生剧烈地，周期性地摆动，严重地威胁机组的安全。

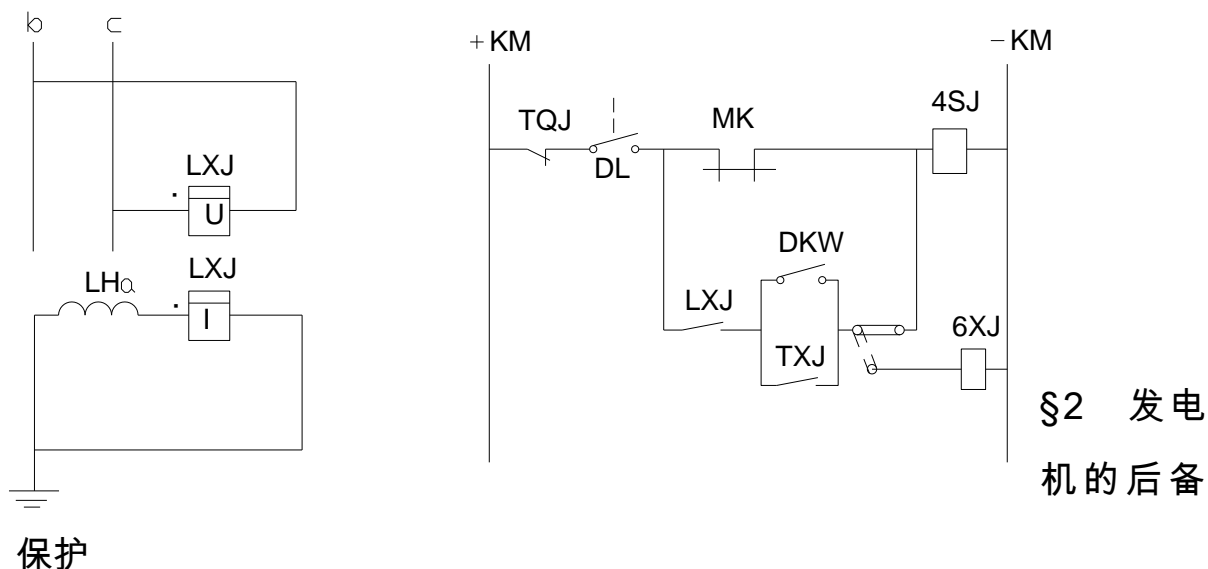
4、发电机失磁运行时，定子端部漏磁增强，将使端部的部件及边段铁心过热。

(三)失磁保护装设原则

对于 100MVA 以下及允许失磁的发电机，以及根据电力系统稳定条件不允许异步运行的发电机等，当采用直流励磁机时，在自动灭磁开关断开后，应联锁断开发电机断路器，当采用半导体励磁系统时，则应装设专用的失磁保护。

对容量虽在 100MVA 但对电力系统有重大影响的发电机和 100MVA 及以上的发电机，应装设专用的失磁保护。

三、小型水电站装设的专用失磁保护



发电机的后备保护既是发电机内部相间短路主保护的近后备保护，也是相邻元件相间短路主保护的远后备保护。

发电机的后备保护大多采用常见的过电流保护，但是有其特殊之处，应予以注意：作为发电机后备保护的过电流保护只反应其本身提供的短路电流，故其灵敏度一般难以满足要求。为了保证灵敏度满足要求，通常采取的主要措施是：

- 1、采用三相式接线方式；
- 2、采用低电压或复合电压起动方式；
- 3、采用反应短路电流负序分量的电流保护

一、过电流保护

整定原则：

- 1、按躲过发电机额定电流整定，即

$$I_{dz} = K_k / K_h I_{e-f}$$

式中 K_k -可靠系数，取 1.2；

K_h -继电器的返回参数，取 0.80-0.85；

I_{e-f} -发电机额定电流

继电器动作电流

$$I_{dz-j} = I_{dz} / n_L$$

2、动作时限按下式整定

$$T = t_{s-d} + (1 \sim 2) \Delta t$$

式中 t -本保护的動作时限；

t_{s-d} -上一级元件后备保护的最大動作时限；

Δt -时限级差，一般取 0.5s.

3、灵敏度校验

$$K_{lm} = I_{d^{(2)min}} / I_{dz} \geq 1.2$$

式中 $I_{d^{(2)min}}$ -后备保护范围末端二相短路时流经保护安装处的最小稳态短路电流。

二、复合电压起动的过电流保护

1、电流继电器的整定计算及灵敏度校验同过电流保护。

2、负序电流继电器动作电压按躲过正常运行时的最大不平衡电压整定，据运行经验其动作电压一般为

$$U_{dz-j} = (0.06 \sim 0.12) U_{e-F-2}$$

式中： U_{e-F-2} -发电机额定电压二次值，一般为 105V。

上式亦可改定成

$$U_{dz-j} = 6.3 \sim 12.5V$$

灵敏度校验：

$$K_{lm} = U_{d-z,min} / U_{dz-2} \geq 1.2$$

式中 $U_{d-z,min}$ -后备保护末端不对称短路时，保护安装处的最小负序电压值。

3、接于线电压的低电压继电器动作电压按躲过电动机自启动和发电机失磁时的电压降低值整定，一般为

$$U_{dz}=0.7U_{e-F}$$

继电器动作电压

$$U_{dz-j}=U_{dz}/n_y=74V$$

灵敏度校验：

$$K_{lm}=U_{dz}/U_{cy^{(3)}\max}\geq 1.2$$

式中 $U_{cy^{(3)}\max}$ -后备保护范围末端三相短路时，保护安装处的最大残压；

U_{e-F} -发电机额定电压；

U_{dz} -保护安装处的一次动作电压。

§3 过负荷保护

$$I_{dz}=(K_k/K_h)I_{e-F}$$

式中 K_k -可靠系数，取 1.05。

继电器动作电流

$$I_{dz-j}=I_{dz}/n_L$$

动作时限应大于其他后备保护的**最大动作时限**。

§4 例题

题参考第 29 次授课。

解：(一)复合电压起动的过电流保护

1、参数整定

1⁰ 电流继电器： $I_{dz}=K_k/K_h I_{e-F}=1.2/0.85\times 573=809(A)$

2⁰ 负序电压继电器： $U_{dzj-z}=8v$

3⁰ 低电压继电器： $U_{dz-j}=74V$

4° 时间继电器： $t=t_{s-d}+\Delta t$

2、灵敏度校验

1° 电流继电器： $K_{lm}=I_{d(2)\cdot min}/I_{dz}=1710/809=2.11 > 1.2$

满足要求。

因为继电器是三相式的，Y/△-11 变压器 Y 侧两相短路，△侧上有一相线电流等于三相短路电流，所以不用两相面用三相。

2° 负序电压继电器

$K_{lm}=U_{d-z\cdot min}/U_{dz\cdot j\cdot zny}=3600/8\times 60=7.5 > 1.2$

满足要求。

3° 低电压继电器

$K_{lm}=U_{dz\cdot jny}/U_{cy(3)\cdot max}=74\times 60/1700=2.6 > 1.2$

满足要求。

(二)过负荷保护

$I_{dz}=K_k/K_{hl}\cdot I_e=1.05/0.85\times 573=708(A)$

$I_{dz\cdot j}=I_{dz}/n_L=708/150=4.7(A)$

动作时限： $t'=t+\Delta t$

§5 过电压保护

一、保护设置理由

当发电机因突然甩负荷，且电枢反应消失时，发电机转速急增，而励磁电流又不能突变，故发电机定子绕组将产生过电压。过电压会危及发电机及其它电力设备的安全运行，例如使发电机定子绕组绝缘击穿，铁心饱和而过热以及升压变压器过励磁而损坏等。定子绕组过电压，主要发生在调速系统不能保证快速关闭导流叶轮，故当其甩负荷时，发电机转速可能升高(40-60)%，以致定子绕组电压可能升高(30-50)%。在汽轮发电机，在汽轮发

电机，一般借自动调速系统和自动调节励磁系统的作用即可防止定子绕组过电压；而在水轮发电机，则须装设专用继电保护装置来防止因过电压而损坏设备。

二、保护整定计算

动作电压根据定子绕组绝缘情况而定，一般用下式整定：

$$U_{dzj}=U_{dz}/n_y=(1.5-1.7)U_{eF}/n_y=158-179V$$

动作时限一般为 0.5S。

§6 发电机保护识图

主要讲授模拟电站发电机保护回路图。

授课课次：32

【教学内容】绪论；微机保护的硬件结构。

【教学目的】通过教学，使学生掌握微机保护的优缺点、微机保护的硬件组成及各组成部分的构成、作用

【教学重点】微机保护的硬件组成。

【教学难点】微机保护硬件各构成部分的工作原理。

【教学过程】

项目八 微机保护

一、计算机继电保护的发展

在继电保护技术领域，计算机除了用作故障分析和保护动作性能分析外，1965 年已提出用计算机构成继电保护装置。

在 20 世纪 70 年代，计算机继电保护的研究工作主要是作理论探索，只有个别部门作了一些现场试验，但是限于计算机硬件的制造水平以及价格问题，故当时还不具备商业性地生产计算机继电保护装置的条件。

到了 20 世纪 70 年代末期，计算机出现了重大突破，大规模集成电路技术飞速发展，出现了一批功能足够强的微型计算机，价格也大幅度降低，因而无论在技术上还是经济上，已具备用一台微型计算机来完成一个电气设备保护功能的条件。1979 年美国电气和电子工程师学会的教育委员会组织过一次世界性的计算机继电保护研究班。在此之后，世界各大继电器制造商都先后推出了各种定型的商业性微型计算机保护装置产品。目前发展最快的是

日本，据日本有关部门预计，1987年的定货可能达到继电保护设备总产值的70%

我国在计算机保护方面的研究工作起步较晚，但进步却很快。1984年，华北电力学院研制的第一台以6809（CPU）为基础距离保护样机在经过试运行后通过了科研鉴定，它标志着我国计算机保护的开发开始进入了重要的发展阶段。

二、微机继电保护装置的特点

- 1、调试工作量小。
- 2、可靠性高。
- 3、能够记录和输出故障时的有关信息量，方便事故分析和处理。
- 4、在不改变硬件条件下，只改变程序就可以改变保护的特性和功能，可灵活地适应电力系统运行方式的变化。
- 5、提供了一些解决问题的新方法和新原理。

三、计算机继电保护的基本组成

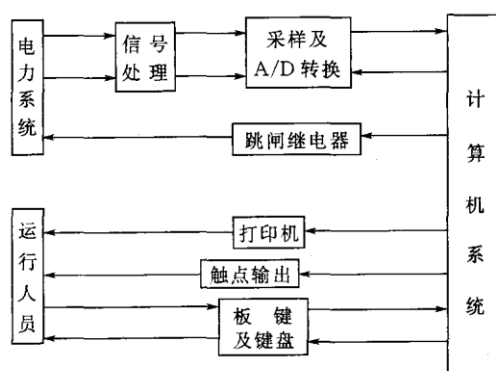


图 0-1 计算机继电保护的总框图举例

四、微机继电保护的优、缺点

（一）优点：

- （1）程序可以实现自适应性，可按系统运行状态而自动改变整定值和特性。

- (2) 有可存取的存储器。
- (3) 在现场可灵活地改变继电器的特性。
- (4) 可以使保护性能得到更大的改进。
- (5) 有自检能力。
- (6) 有利于事故后分析。
- (7) 可与计算机交换信息
- (8) 可增加硬件的功能。
- (9) 可在低功率传变机构内工作。

(二) 缺点：

- (1) 与传统的保护有根本性的背离。
- (2) 使用者较难维护。
- (3) 要求硬件和软件有高度可靠性
- (4) 硬件很快成为过时。
- (5) 在操纵和维护过程中，使用人员较难掌握。

§2 微机保护装置的硬件原理

一、微机保护装置的硬件结构

(一) 硬件结构框图

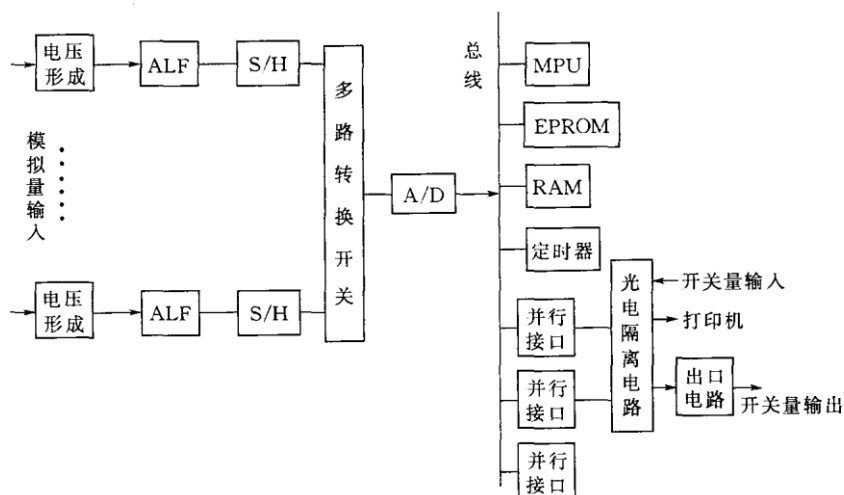


图 1-1 微机继电保护硬件示意框图

(二) 各组成部分作用

1、信号输入电路

微机保护装置输入信号主要有两类，即开关量和模拟量信号。信号输入部分就是妥善处理这二类信号，完成单片微机输入信号接口功能。

2、单片微机系统

微机保护装置的核心是单片机系统，它是由单片微机和扩展芯片构成的一台小型工业控制微机系统，除了硬件之外，还有存储在存储器里的软件系统。这些硬件和软件构成的整个单片微机系统主要任务是完成数值测量、逻辑运算及控制和记录等智能化任务。除此之外，现代的微机保护应具备各种远方功能，它包括发送保护信息并上传给变电站微机监控系统，接收集控站、调度所的控制和管理信息。

这种单片微机系统可以是单 CPU 或采用多 CPU 系统。

3、人机接口

在许多情况下，单片微机系统必须接受操作人员的干预，如整定值输入、工作方式的变更，对单片微机系统状态的检查等都需要人机对话。这部分工作在 CPU 控制之下完成，通常可以通过键盘、汉化液晶显示、打印机及信号灯、音响或语言告警等来实现人机对话。

4、输出通道

输出通道部分是对控制对象实现控制操作的出口通道。通常这种通道主要任务是将小信号转换为大功率输出，满足驱动输出的要求。在出口通道里还要防止控制对象对微机系统的反馈干扰，因此出口通道也需要光隔离。显然输出通道仍然是一种被控对象与微机系统之间的接口电路。

5、电源

微机保护系统对电源要求较高，通常这种电源是逆变电源，即将直流逆变

为交流，再把交流整流为微机系统所需要的直流电压。它把变电所的强电系统的直流电源与微机的弱电系统电源完全隔离开。通过逆变后的直流电源具有极强的抗干扰水平，对来自变电所中的因断路器跳合闸等原因产生的强干扰可以完全消除掉。

二、微机保护的数据采集系统

1、电压形成回路

微机继电保护要从被保护的电力线路或设备的电流互感器、电压互感器或其他变换器上取得信息。但这些互感器的二次数值、输入范围对典型的微机继电保护电路却不适用，需要降低和变换。在微机继电保护中通常要求输入信号为 $\pm 5V$ 或 $\pm 10V$ 的电压信号，具体决定于所用的模数转换器。

2、采样保持电路

(1) 采样的基本原理

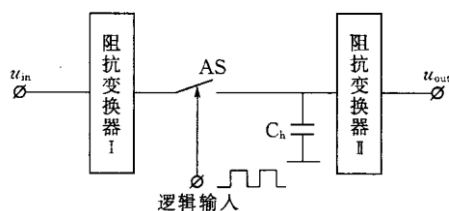


图 1-2 采样保持电路原理图

(2) 对采样电路的基本要求

(3) 采样方式

(4) 采样频率的选择

可以证明，如果被采样信号中所含最高频率成一约频率为 f_{\max} ，则采样频率 f_s 必须大于 f_{\max} 的二倍，否则将造成频率混叠。

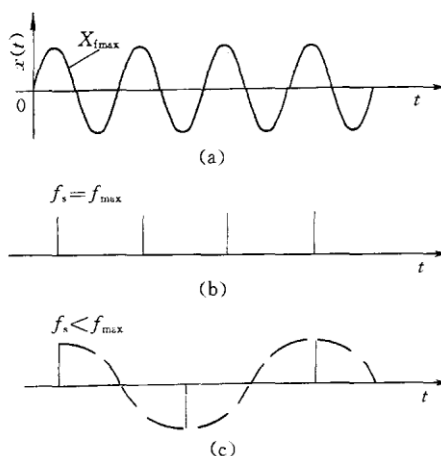


图 1-7 频率混叠示意图

3、模拟量多路转换开关

由于保护装置所需同时采样的电流和电压模拟量不会很多，只要模数变换器的转换速度足够高，在一个采样周期的保持时间内上述各种模拟量依次模数变换的要求是能满足的。但由于模数转换器价格昂贵，通常不是每个模拟量输入通道设一个 A / D ，而是公用一个，中间经多路转换开关切换轮流由公用的 A / D 转换成数字量输入给微机。多路转换开关包括选择接通路数的二进制译码电路和由它控制的多路电子开关，它们被集成在一个集成电路芯片中。

4、模数转换器 (A/D)

由于计算机只能对数字量进行运算，而电力系统中的电流、电压信号均为模拟量，因此必须采用模数转换器将连续的模拟量变为离散的数字量。

5、光隔原理

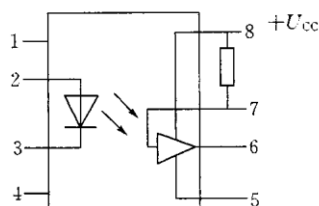


图 1-11 6N137 芯片结构图

三、保护 CPU 模块工作原理

保护 CPU 模块是保护装置智能核心部分，具体任务是完成数据的采集、保护逻辑判断、保护故障巡检、开关量输入与输出及人机接口的串行通信等任务。

四、开关量输入输出回路原理

一、开关量输入回路

开关量输入回路包括断路器和隔离开关的辅助触点或跳合闸位置继电器接点输入，外部装置闭锁重合闸触点输入，轻瓦斯和重瓦斯继电器接点输入，还包括装置上连接片位置输入等回路。

对微机继电保护装置的开关量输入，即接点状态（接通或断开）的输入可以分成以下两大类。

(1) 安装在装置面板上的接点。这类接点包括在装置调试时用的或运行中定期检查装置用的键盘接点以及切换装置工作方式用的转换开关等。

(2) 从装置外部经过端子排引入装置的接点。例如需要由运行人员不打开装置外盖而在运行中切换的各种压板，转换开关以及其他保护装置和操作继电器等。

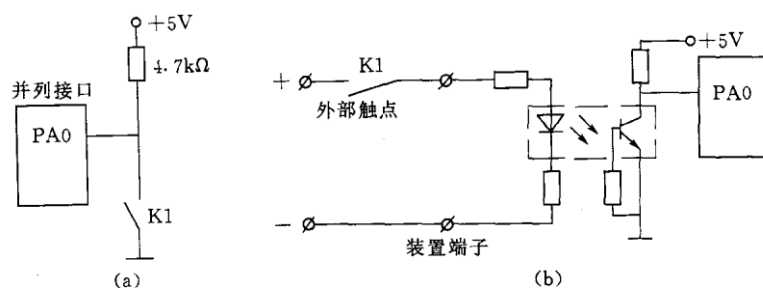


图 1-22 开关量输入电路原理图

(a) 装置内接点输入回路；(b) 装置外接点输入回路

二、开关量输出回路

开关量输出主要包括保护的跳闸出口以及本地和中央信号等，一般都采用并行接口的输出口来控制有接点继电器（干簧或密封小中间继电器）的方

法，但为提高抗干扰能力，最好也经过一级光电隔离，如图 1-23 所示。

只要通过软件使并行口的 PBO 输出“ 0 ”，PBI 输出“ 1 ”，便可使与非门 HI 输出低电平，光敏三极管导通，继电器 K 被吸合。

在初始化和需要继电器 K 返回时，应使 PBO 输出“ 1 ”，PBI 输出

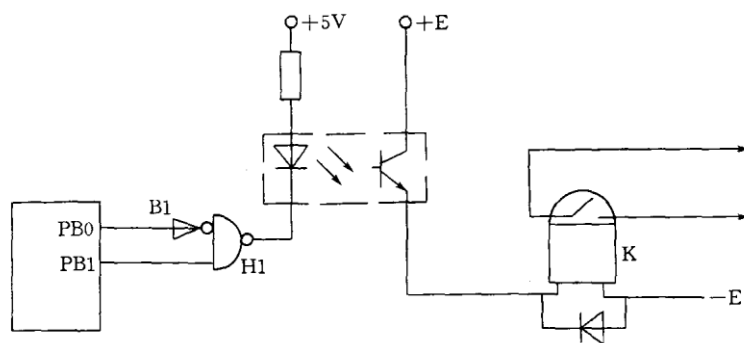


图 1-23 装置开关输出回路接线图

0。

设置反相器 B1 及与非门 HI 而不将发光二极管直接同并行口相连，一方面是因为并行口带负载能力有限，不足以驱动发光二极管，另一方面因为采用与非门后要满足两个条件才能使 K 动作，增加了抗干扰能力。

为了防止拉合直流电源的过程中继电器 K 的短时误动，将 PBO 经一反相器输出，而 PBI 不经反相器输出。因为在拉合直流电源过程中，当 SV 电源处于某一个临界电压值时，可能由于逻辑电路的工作紊乱而造成保护误动作，特别是保护装置的电源往往接有大量的电容器，所以拉合直流电源时，无论是 SV 电源还是驱动继电器 K 用的电源 E，都可能相当缓慢的上升或下降，从而完全可能来得及使继电器 K 的接点短时闭合。由于采用上述接法

后，两个反相条件的互相制约，可以可靠地防止误动作。

三、开出驱动与开出自检电路原理

开出驱动回路由 8255B 端口驱动芯片与非门电路、光隔电路、驱动电路及反馈回路组成，如图 1 - 24 所示，共 6 路开出驱动回路，光隔和反馈电路均由 MCT275 光电隔离芯片构成。为了驱动 KCO_A ，必须在 $PB6=0$ 、 $PB7=1$ 同时满足时才能使 7400 的输出 6 端为低电平，使光隔中二极管和光敏三极管导通，驱动 V3 导通。于是接通了以下回路： $+24V \rightarrow AXJN \rightarrow V3_{ce} \rightarrow V6 \rightarrow IC23 \rightarrow -24V$ 。

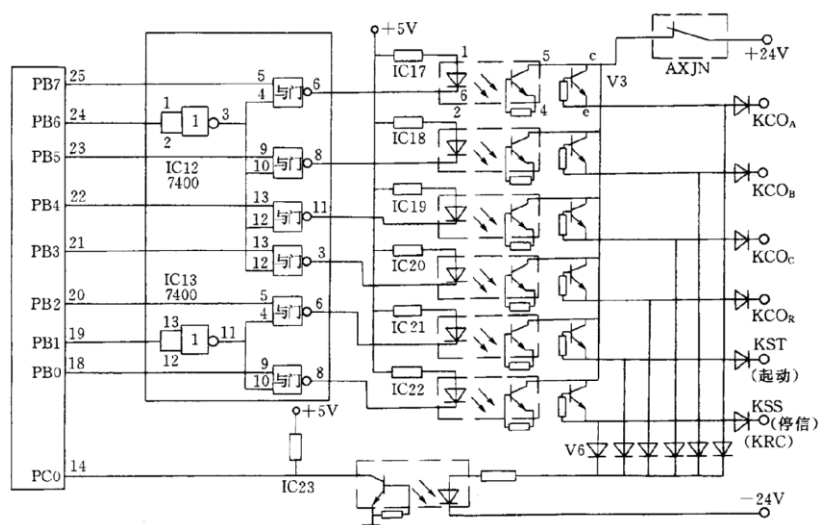


图 1-24 开出驱动回路与自检回路

一方面驱动 A 相出口继电器 KCO_A ，另一方面通过光隔 IC23 反馈至 8255A 的 PC_0 使 8255 的 $PC_0=0$ 。在开出自检程序中可驱动各开出回路并检查 PC_0 是否为 0，即可判断开出回路是否正常。由于出口继电器 KCO_A 受起动继电器的闭锁，且自检时间极短（不足 $10\mu s$ ），不致使出口继电器 KCO_A 动作，所以不会导致保护误动作。

B 相和 C 相的停信、永跳、起动的驱动继电器的回路均同上述 A 相驱动回路相同。

四、出口闭锁

1、自检告警闭锁

出口的闭锁，有自检告警闭锁和三取二起动电路两个回路。自检告警闭锁是指图 1-24 的 6 路开出量的 + 24V 闭锁，它是经自检告警继电器的动断触点 AXJN 控制的，在自检告警时，断开跳闸电源实现出口闭锁。自检告警继电器 AXJN 驱动电路类似于上述 KCO_A 回路的结构。

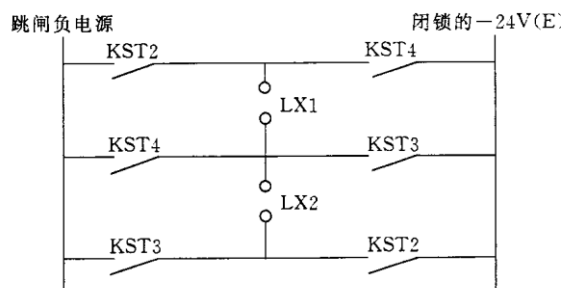


图 1-25 三取二起动（闭锁）回路

2、三取二起动回路

起动继电器兼作总开放控制，采取三取二起动方式控制跳闸负电源，如图 1-25 所示。它由高频保护起动 KSTZ、距离保护起动 KST3、零序保护起动 KST4 组成，用 KSTZ、KST3、KST4 各两个动合触点交叉组成三取二循环起动（闭锁）方式来控制跳闸负电源，防止了由于一个 CPU 程序出格引起整套保护装置误动。只有在三套保护中两套保护起动时，整套保护才能起动，提高了保护装置的可靠性。当需将三取二起动回路退出运行时，

可以将 LX1 和 LX2 短接。

五、人机接口回路原理

1、人机接口原理

微机保护的人机接口回路是指键盘、显示器及接口 CPU 插件电路。人机接口回路的主要作用，是通过键盘和显示器完成人机对话任务、时钟校对及与各保护 CPU 插件通信和巡检任务。在单 CPU 结构的保护中，接口 CPU 就由保护 CPU 兼任。为了减轻保护 CPU 的负担，可由可编键盘、显示器专用接口芯片 8279 来完成键盘、显示器与保护 CPU 的接口任务，时钟校对由 MC146818 独立完成，如图 1-26 所示。

在多 CPU 结构的保护中，另设有专用的人机接口 CPU 插件。接口 CPU 除了要完成人机接口（键盘、显示器）的任务外，还要完成与各 CPU 通信管理、巡检及时间校对、程序出错自复位等多项任务。人机接口 CPU 插件框图如图 1-27 所示。与保护 CPU 相类似，在接口 CPU 插件上除了 8031CPU 外，还扩展有 EPROM、RAM，串行及并行扩展芯片 8256，时钟电路 MC146818 芯片及自复位用的计数器 74LS393。

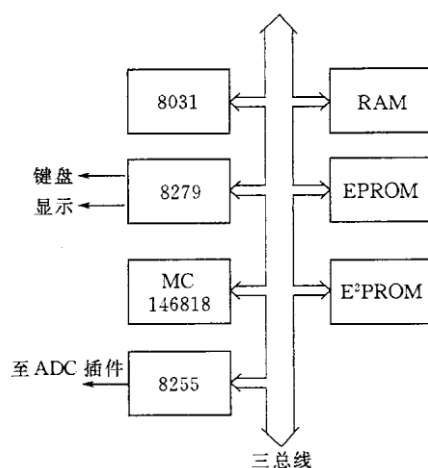


图 1-26 单 CPU 结构保护的人机接口芯片与保护 CPU 的连接

2、键盘输入电路

(1) 键输入的接口功能

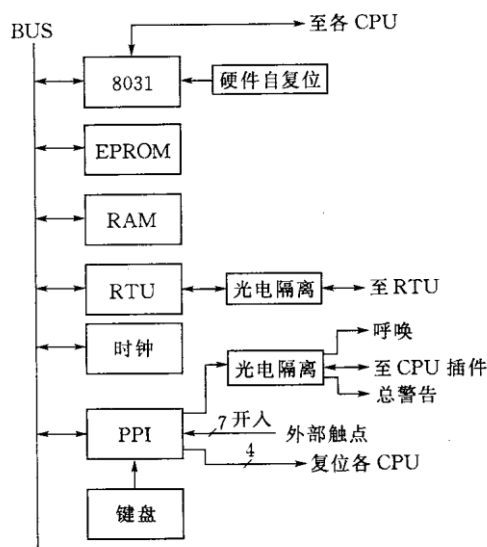


图 1-27 多 CPU 结构保护的

2) 按键编码

3) 键盘检测功能

(2) 键盘输入电路

为了简便操作，单片机键盘不必像 PC 机那么繁杂，保护装置键盘键的数量应尽可能减少。人机接口的面板上键盘只有七个键：“↑”、“↓”、“←”、“→”、“Q”（返回键）、“复位”和“确认”键。“复位”和“确认”键用于装置复位和操作确认。这样可以使得电路十分简单，操作也很方便。键盘输入电路有两种，一种是独立键盘电路，另一种是行列式按键电路。

1) 独立式按键电路

2) 行列式按键电路

(3) 串行通信接口电路

1) 串行通信接口电路及其作用

2) 巡检及巡检中断告警

(4) 硬件时钟电路

接口插件设置了一个硬件时钟电路，由一片 MC146818 时钟芯片及辅助元器件组成。

芯片时钟的工作方式分述如下：

1) 正常运行方式

当接口 CPU 复位重新开始执行程序初始化工作完成后，从硬件时钟取时间值通过 CPU 串行通信口送到保护 CPU 插件内部时钟存储单元，去校对保护 CPU 的软件时钟。此外每隔一定时间，该硬件时钟对保护内部时钟的存储单元同步校正一次，以确保四个保护的软件时钟的正确性，实现了对各 CPU 软件时钟的同步校对。

2) 修改时间

运行人员欲修改时间，可在运行方式下按提示的格式输入正确时间，确认后硬件时钟按所输入的时间开始运行。

3) 保护装置直流电源掉电时

保护软件时钟丢失，但接口硬件时钟由电池供电继续运行，直流恢复后又重新把接口硬件时钟的时间通过串行通信送入保护内部软件时钟存储单元，确保时钟不间断计时。

(5) 硬件自复位电路

硬件自复位电路是为了防止人机接口 CPU 程序出格而装设的。自复位电路由 MC146818、7415393 计数器和 SO31CPU 组成。

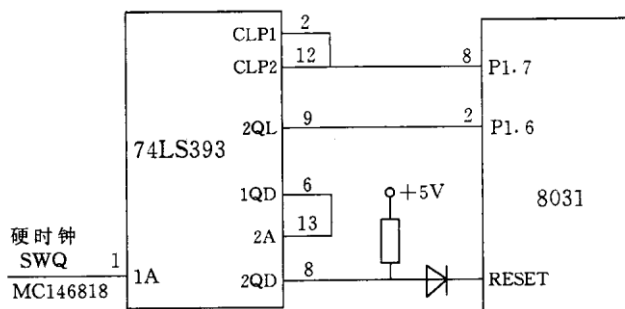


图 1-33 硬件自复位电路

§3 作业

补充习题

- 1、与常规继电保护相比较，微机保护有哪些优缺点？
- 2、微机保护装置的硬件结构一般由哪几部分组成？

授课课次：33

【教学内容】 微机保护的软件原理。

【教学目的】 通过教学，使学生掌握微机保护软件的系统配置和微机保护的算法。

【教学重点】 微机保护的软件配置与算法。。

【教学难点】微机保护算法的实现。

【教学过程】

复习回顾

1. 微机保护有什么特点？
2. 微机保护装置硬件结构一般包括哪些组成部分？
3. 模拟量采样回路各组成部分的作用？

§1 微机保护软件的系统配置

由于微机保护的硬件分为人机接口和保护两大部分，因此相应的软件也就分为接口软件和保护软件两大部分。

一、 接口软件

接口软件是指人机接口部分的软件，其程序可分为监控程序和运行程序。执行哪一部分程序由接口面板的工作方式或显示器上显示的菜单选择来决定。调试方式下执行监控程序，运行方式下执行运行程序。

监控程序主要就是键盘命令处理程序，是为接口插件（或电路）及各 CPU 保护插件（或采样电路）进行调节和整定而设置的程序。

接口的运行程序由主程序和定时中断服务程序构成。主程序主要完成巡检（各 CPU 保护插件）、键盘扫描和处理及故障信息的排列和打印。定时中断服务程序包括了以下几个部分：软件时钟程序、以硬件时钟控制并同步各 CPU 插件的软时钟、检测各 CPU 插件启动元件是否动作的检测启动程序。所谓软件时钟就是每经 1.66ms 产生一次定时中断，在中断服务程序中软件计数器加 1，当软计数器加到 600 时，秒计数加 1。

二、 保护软件的配置

各保护 CPU 插件的保护软件配置为主程序和二个中断服务程序。主程序通常都有三个基本模块：初始化和自检循环模块、保护逻辑判断模块和跳

闸处理模块。通常把保护逻辑判断和跳闸处理总称为故障处理模块。一般而言，前后二个模块，在不同的保护装置中基本上是不同的，而保护逻辑判断模块就随不同的保护装置而相差甚远。如距离保护中保护逻辑就包含有振荡闭锁程序部分，而零序电流保护就没有振荡闭锁程序部分。中断服务程序有定时采样中断服务程序和串行口通信中断服务程序。在不同的保护装置中，采样算法是不相同的，采样算法有些不同或因保护装置有些特殊要求，使得采样中断服务程序部分也不尽相同。不同保护的通信规约不同，也会造成程序的很大差异。

三、 保护软件的三种工作状态

保护软件有三种工作状态：运行、调试和不对应状态。不同状态时程序流程也就不相同。有的保护没有不对应状态，只有运行和调试两种工作状态。当保护插件面板的方式开关或显示器菜单选择为“运行”，则该保护就处于运行状态，其软件就执行保护主程序和中断服务程序。当选择为“调试”时，复位 CPU 后就工作在调试状态。当选择为“调试”但不复位 CPU 并且接口插件工作在运行状态时，就处于不对应状态。也就是说保护 CPU 插件与接口插件状态不对应。设置不对应状态是为了对模数插件进行调整，防止在调试过程中保护频繁动作及告警。

四、 中断服务程序及其配置

1 . 实时性与中断工作方式概述

绝大多数的工控计算机软件都采用了中断技术，微机保护装置是实时性要求较强的工控计算机设备，更是离不开中断的工作方式。

所谓实时性就是指在限定的时间内，对外来事件能够及时作出迅速反应的特性。如保护装置。保护要对外来事件做出及时反应，就要求保护中断自己正在执行的程序，而去执行服务于外来事件的操作任务和程序。实时性还

有一种层次的要求，即系统的各种操作的优先等级是不同的，高一级的优先操作应该首先得到处理。总之，由于外事件是随机产生的，凡需要 CPU 立即响应并及时处理的事件，必须用中断的方式可实现。

2 . 中断服务程序的概念

(1) 定时采样中断服务程序：一般采用定时器中断方式，每经 1.56 ms 中断原程序的运行，转去执行采样计算的服务程序，采样结束后通过存储器中的特定存储单元将采样计算结果传送给原程序，然后再回去执行原被中断了的程序。这种采用定时中断方式的采样服务程序称为定时采样中断服务程序。

(2) 键盘中断服务程序：保护装置还应随时接受工作人员的干预，即改变保护装置的工作状态、查询系统运行参数、调试保护装置，这就是利用人机对话方式来干预保护工作。这种人机对话是通过键盘方式进行的，常用键盘中断服务程序来完成。有的保护装置不采用键盘中断方式，而采用查询方式。

(3) 串行口中断服务程序：当系统主机对保护装置有通信要求时，或者接口 CPU 对保护 CPU 提出巡检要求时，保护串行通信口就提出中断请求，在中断响应时，就转去执行串行口通信的中断服务程序。

3 . 保护的 中断服务程序配置

根据中断服务程序基本概念的分析，一般保护装置总是配有定时采样中断服务程序和串行通信中断服务程序。对单 CPU 保护，CPU 除保护任务之外还有人机接口任务，因此还可以配置有键盘中断服务程序。

§2 微机保护的算法

一、概述

微机保护装置根据模数转换器提供的输入电气量的采样数据进行分析、运算和判断，以实现各种继电保护的功用的方法称为算法。

按算法的目标可分为两大类。一类是根据输入电气量的若干点采样值通过数学式或方程式计算出保护所反映的量值，然后与给定值进行比较。例如为

实现距离保护，可根据电压和电流的采样值计算出复阻抗的模和幅角或阻抗的电阻和电抗分量，然后同给定的阻抗动作区进行比较。这一类算法利用了微机能进行数值计算的特点，从而实现许多常规保护无法实现的功能，例如作为距离保护，它的动作特性的形状可以非常灵活，不像常规距离保护的動作特性形状决定于一定的動作方程。此外还可以根据阻抗计算值中的电抗分量推算出短路点距离，起到测距的作用等。另一类算法，仍以距离保护为例，它是直接模仿模拟型距离保护的实现方法，根据動作方程来判断是否在動作区内，而不计算出具体的阻抗值。

算法是研究计算机继电保护的重点之一。分析和评价各种不同的算法优劣的标准是精度和速度。

二、正弦函数模型的算法

假设被采样的电压、电流信号都是纯正弦特性，即不含有非周期分量，又不含有高频分量。这样可以利用正弦函数一系列特性，从若干个采样值中计算出电压、电流的幅值、相位以及功率和测量阻抗的量值。

正弦量的算法是基于提供给算法的原始数据为纯正弦量的理想采样值。以电流为例 可表示为

$$i(nT_s) = \sqrt{2} I \sin(\omega n T_s + \alpha_{01}) \quad (3-1)$$

式中 ω ——角频率；

I ——电流有效值；

T_s ——采样间隔；

α_{01} —— $n=0$ 时的电流相角。

实际上故障后电流、电压都含有各种暂态分量，而且数据采集系统还会引人各种误差，所以这一类算法要获得精确的结果，必须和数字滤波器配合使用。也就是说式(3—1)中的 $i(nT_s)$ 应当是数字滤波器的输出，而不是直接

应用模数转换器提供的原始采样值。

下面以两点乘积算法为例进行说明：

采样值算法是利用采样值的乘积来计算电流、电压、阻抗的幅值和相角等电气参数的方法，由于这种方法是利用 2~3 个采样值推算出整个曲线情况，所以属于曲线拟合法。其特点是计算的判定时间较短。

以电流为例，设 i_1 和 i_2 分别为两个相隔为 $\pi / 2$ 的采样时刻， n_1 和 n_2 的采样值（如图 3—1 所示），即

$$\omega(n_2 T_s - n_1 T_s) = \frac{\pi}{2} \quad (3-1)$$

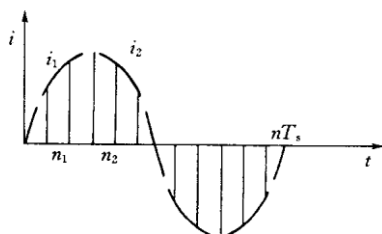


图 3-1 两点乘积算法采样示意图

根据式 (3 - 1) 有

$$i_1(n_1 T_s) = \sqrt{2} I \sin(\omega n_1 T_s + a_{01}) = \sqrt{2} I \sin a_{11} \quad (3-3)$$

$$i_2(n_2 T_s) = \sqrt{2} I \sin(\omega n_2 T_s + a_{01} + \pi/2) = \sqrt{2} I \cos a_{11} \quad (3-4)$$

式中。 $\omega n_1 T_s + a_{01} = n_1 \omega T_s + a_{01} - n_1 \omega T_s + a_{01}$ 采样时刻电流的相角，可能为任意值。

将式 (3—3) 和式 (3—4) 平方后相加，即得

$$2I^2 = i_1^2 + i_2^2 \quad (3-5)$$

再将式 (3-3) 和式 (3-4) 相除，得

$$\operatorname{tga}_{11} = \frac{i_1}{i_2} \quad (3-6)$$

式(3-5)和式(3-6)表明,只要知道任意两个相隔 $\pi/2$ 的正弦量的瞬时值,就可以计算出该正弦量的有效值和相位。

如欲构成距离保护,只要同时测出 n_1 和 n_2 时刻的电流和电压 u_1 、 i_2 和 u_2 、 i_1 类似用式(3-5)和式(3-6)即可求得电压的有效值 U 及在 u_1 时刻的相角 a_{1u} ,即

$$\begin{aligned} 2U^2 &= u_1^2 + u_2^2 \\ \operatorname{tg} a_{1u} &= \frac{u_1}{u_2} \end{aligned} \quad (3-7) \quad (3-8)$$

从而可求出复阻抗的模量 Z 和幅角 a_z

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{\sqrt{u_1^2 + u_2^2}}{\sqrt{i_1^2 + i_2^2}} \quad (3-9)$$

$$a_z = a_{1u} - a_{1I} = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{u_1}{u_2}\right) - \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{i_1}{i_2}\right) \quad (3-10)$$

实用上,更方便的算法是求出复阻抗的电阻分量 R 和电抗分量 L 即可。将电流和电压写成复数形式,即

$$\dot{U} = U \cos a_{1u} + jU \sin a_{1u}$$

$$\dot{I} = I \cos a_{1I} + jI \sin a_{1I}$$

参照式(3-3)和式(3-4),可得

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \frac{u_2 + ju_1}{\sqrt{2}} \\ \dot{I} &= \frac{i_2 + ji_1}{\sqrt{2}} \end{aligned}$$

于是

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{u_2 + ju_1}{i_2 + ji_1} \quad (3-11)$$

将上式的实部和虚部分开,其实部即为 R ,虚部则为 X ,因此

$$R = \frac{u_1 i_1 + u_2 i_2}{i_1^2 + i_2^2}$$

$$X = \frac{u_1 i_2 - u_2 i_1}{i_1^2 + i_2^2}$$

由于式(3—12)和式(3—13)中用到了两个采样值的乘积,因此称为两点乘积法。 \dot{U} 、 \dot{i} 之间的相角差可由下式计算

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{u_1 i_2 - u_2 i_1}{u_2 i_1 + u_1 i_2} \quad (3-14)$$

上述乘积用了两个相隔 $\pi/2$ 的采样值。事实上,两点乘积法从原理上并不是必须用相隔 $\pi/2$ 的两个采样值。用正弦量任何两点相邻的采样值都可以算出有效值和相角。

§3 作业

补充习题

1. 微机保护算法的概念?衡量算法优劣的指标有哪些?
2. 微机保护软件有哪几种工作状态?